

ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ
ΕΘΝΙΚΗΣ ΠΑΙΔΕΙΑΣ
ΚΑΙ ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ

ΠΑΙΔΑΓΩΓΙΚΟ ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ

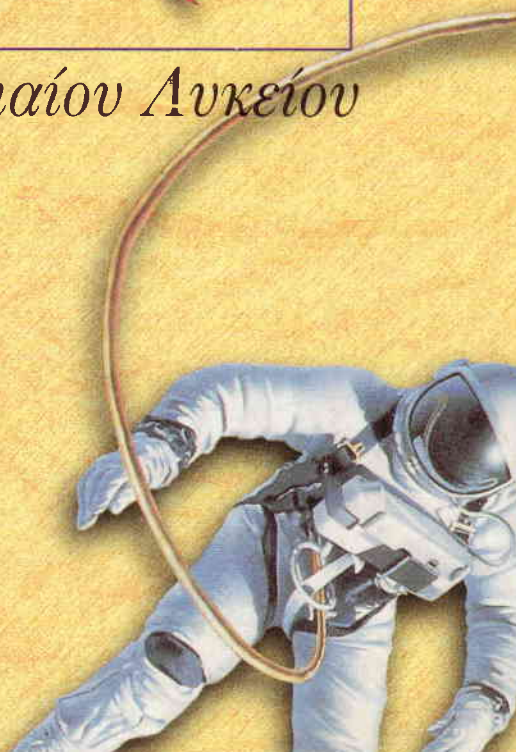


Φυσική

Α΄ τάξη



Ενιαίου Λυκείου





Φυσική

Α′ τάξη Ενιαίου Λυκείου

Υπουργείο Εθνικής Παιδείας και Θρησκευμάτων
Παιδαγωγικό Ινστιτούτο

ΝΙΚΟΣ ΔΑΠΟΝΤΕΣ
ΑΝΔΡΕΑΣ ΙΩΑΝΝΟΥ ΚΑΣΣΕΤΑΣ

Φυσική

Α' τάξη
Ενιαίου Λυκείου

ΟΡΓΑΝΙΣΜΟΣ ΕΚΔΟΣΕΩΣ ΔΙΔΑΚΤΙΚΩΝ ΒΙΒΛΙΩΝ
ΑΘΗΝΑ

Το βιβλίο αυτό είναι εναρμονισμένο προς το ισχύον πρόγραμμα Σπουδών για το Ενιαίο Λύκειο και έχει προκύψει από τη ριζική αναμόρφωση του σχολικού εγχειριδίου Φυσική για την Α Λυκείου ΓΕΛ ΕΠΛ ΤΕΛ των Ν. Δαπόντε, Α. Κασσέτα, Σ Μουρίκη και Σ. Σκιαθέτη, έκδοση ΟΕΔΒ 1997.
Ευχαριστούμε τους δεκάδες συναδέλφους μας καθηγητές Δευτεροβάθμιας Εκπαίδευσης και ιδιαίτερα τους υπεύθυνους των Εργαστηριακών Κέντρων Φυσικών Επιστημών οι οποίοι με τις εύστοχες παρατηρήσεις τους συνέβαλαν στην τελική διαμόρφωση του συγκεκριμένου βιβλίου.
Ευχαριστούμε επίσης τον κ. Βασίλη Ευθυμίου και την κ. Αφροδίτη Ζερβού στις φροντίδες των οποίων οφείλεται, σε μεγάλο βαθμό, η καλαισθησία της έκδοσης.

Περιεχόμενα

Προλογικό σημείωμα 7
Εισαγωγή 8
Ο χώρος και ο χρόνος 11
Ο χώρος 12
Ο χρόνος 19
Ερωτήσεις και προβλήματα 23
Ντοκουμέντο 25

Η περιγραφή της κίνησης 27
Η κίνηση 28
Η γλώσσα της περιγραφής 30
Κίνηση σε μιά διάσταση 36
Η ελεύθερη πτώση 51
Η καμπυλόγραμμες κινήσεις 57
Η κυκλική κίνηση 60
Οι σύνθετες κινήσεις 63
Ερωτήσεις και προβλήματα 68
Ντοκουμέντα 78

Η Νευτωνική σύνθεση 79
Η έννοια *δύναμη* 81
Η αριστοτελική Φυσική 88
Ο πρώτος νόμος της κίνησης 90
Ο δεύτερος νόμος της κίνησης 94
Ο τρίτος νόμος της κίνησης 103
Νόμοι των δυνάμεων 106
Δυναμική στην κυκλική κίνηση 112

Η παγκόσμια έλξη 115

Η διατήρηση της ορμής 127

Ερωτήσεις και προβλήματα 133

Ντοκουμέντο 147

Η γλώσσα της ενέργειας 149

Νευτωνική δυναμική και Βιομηχανική Επανάσταση 150

Μεταβιβαζόμενη ενέργεια 153

Δυναμική ενέργεια 166

Η διατήρηση της μηχανικής ενέργειας 173

Η μηχανική ενέργεια ελαττώνεται 178

Αύξηση της μηχανικής ενέργειας 180

Ερωτήσεις και προβλήματα 185

Ντοκουμέντο 193

Η ενέργεια διατηρείται και υποβαθμίζεται 195

Η θερμοκρασία 196

Θερμοκρασία και θερμότητα 202

Η θερμοκρασία είναι μεταβιβαζόμενη ενέργεια 212

Η αρχή της διατήρησης της ενέργειας **214**

Ο πρώτος νόμος της θερμοδυναμικής **218**

Ενέργεια και μικρόκοσμος **223**

Ο δεύτερος νόμος της θερμοδυναμικής **229**

Χημική ενέργεια **238**

Ηλιακή ακτινοβολία **240**

Ερωτήσεις και προβλήματα 243

Ντοκουμέντο 250

Εργαστηριακός οδηγός 251

Α' μέρος Εργαστηριακές ασκήσεις 252

Β' μέρος Δραστηριότητες 252

Βιβλιογραφία 289

Ευρετήριο 291

Προλογικό σημείωμα

1. Μερικές χιλιάδες λέξεις, μια σειρά από εικόνες και ορισμένα σύμβολα συνθέτουν το αποτέλεσμα της προσπάθειας που κάναμε. Βρίσκουμε λοιπόν πως είναι δικαιολογημένη η ανάγκη να μιλήσουμε πρώτα γι' αυτά.

Οι λέξεις. Οι τυπωμένες λέξεις πρωταγωνιστούν. Οι περισσότερες είναι λέξεις της καθημερινής μας γλώσσας. Υπάρχουν, όμως, και ειδικές λέξεις που ανήκουν στη γλώσσα της επιστήμης, οι οποίες στα καθημερινά μας λεξιλόγια είτε δεν εμφανίζονται καθόλου είτε εμφανίζονται αλλά σημαίνουν κάτι διαφορετικό.

Οι εικόνες. Τα σχήματα τα χρησιμοποιήσαμε γιατί πιστεύουμε ότι μπορούν, σε πολλές περιπτώσεις, να οδηγούν στην κατανόηση και να είναι πιο εύγλωτα από μια σειρά λέξεων, που θα μπορούσαμε να είχαμε επιστρατεύσει για τον ίδιο σκοπό. Χρησιμοποιήσαμε φωτογραφίες, γκραβούρες και ορισμένους πίνακες ζωγραφικής θέλοντας πάντα να θυμίζουμε από τη μια το κοινό στοιχείο που διαπερνά όλες τις ανθρώπινες δραστηριότητες και από την άλλη την ανυπέρβλητη δυνατότητα της τέχνης να εκφράζει χωρίς λόγια γεγονότα που είναι δύσκολο να περιγραφούν.
Χρησιμοποιήσαμε και γελοιογραφίες. Πιστεύουμε ότι η συνύπαρξη του σοβαρού με το αστείο είναι ένα γεγονός πολύ σημαντικό. Το χιούμορ είναι ένα εσωτερικό κομμάτι της σοβαρότητας, είναι αυτό που τη δροσίζει και ματαιώνει την αφυδάτωσή της.

Τα σύμβολα. Τα περισσότερα από τα σύμβολα που χρησιμοποιήθηκαν για να παραστήσουν αντίστοιχα φυσικά μεγέθη είναι –συνήθως– αρχικά ξένων λέξεων και είναι σύμφωνα με τα αντίστοιχα σύμβολα που έχουν επικρατήσει στη βιβλιογραφία.

2. Το διδακτικό εγχειρίδιο της φυσικής αποτελεί ένα από τα βοηθητικά μέσα της διδασκαλίας. Μέσα από τις σελίδες του παρουσιάζεται τόσο το επιστημονικό περιεχόμενο (έννοιες, έννοιες/μεγέθη, μοντέλα, νόμοι) όσο και η διαδικασία οικοδόμησής του. Σημείο αφετηρίας μπορεί να είναι γεγονότα από την καθημερινή ζωή ή από το εργαστήριο, αλλά και στοιχεία από την ιστορία των επιστημών.

Εισαγωγή

Η επιστήμη δημιουργείται με τα γεγονότα
όπως ένα σπίτι χτίζεται με τούβλα.
Αλλά η απλή συσσώρευση γεγονότων
δεν είναι επιστήμη
όπως ένας σωρός τούβλα δεν είναι σπίτι.
H. Poincaré

Αν δώσουμε στη Φυσική Επιστήμη μια έννοια πλατύτερη απ' αυτήν που επικρατεί σήμερα, μπορούμε να πούμε ότι γεννήθηκε στην ελληνική Ιωνία τον έκτο αιώνα πριν από το Χριστό. Ήταν η εποχή που ο άνθρωπος έβαζε τα πρώτα, ίσως, κοσμολογικά ερωτήματα, επιχειρούσε την πρώτη τομή ανάμεσα στη μυθική και τη λογική σκέψη. Επρόκειτο για μια πραγματική ανταρσία ενάντια στις δεισιδαιμονίες και τις μυθολογικές εξηγήσεις του Κόσμου. Ήταν η ώρα που η Φυσική και η Φιλοσοφία ξεκινούσαν μαζί για να διασχίσουν ολόκληρη σχεδόν την ελληνική αρχαιότητα.

Η Φυσική της ελληνικής αρχαιότητας, παρόλο που είχε σαν αντικείμενο τη μελέτη της φύσης, βρίσκεται πολύ μακριά από τη σύγχρονη έννοια του όρου. Κι αυτό λόγω της ουσιαστικής απουσίας μεθόδου και πρακτικών εφαρμογών που τη χαρακτήριζαν.

Το βασικό γνώρισμα της Φυσικής με τη σύγχρονη έννοια του όρου είναι η Μέθοδος. Η Φυσική είναι καρπός μια επανάστασης που ξέσπασε στην ευρωπαϊκή σκέψη τον 17ο αιώνα. Μια από τις καινοτομίες που εμφανίστηκαν εκείνη την εποχή είναι η νέα Μέθοδος, η οποία απετέλεσε το αναπνευστικό σύστημα της νεογέννητης τότε επιστήμης. Αν επιχειρήσουμε να περιγράψουμε τη νέα μέθοδο πρέπει καταρχάς να την χαρακτηρίσουμε πειραματική. Τι ακριβώς όμως εννοούμε και τι δεν εννοούμε όταν χρησιμοποιούμε αυτόν τον χαρακτηρισμό; Σαν πρώτο βήμα προς την απάντηση μπορούμε να πούμε ότι η μέθοδος συνίσταται στο να μην οδηγείσαι από θεωρίες αφηρημένες και εκ προοιμίου αποδεκτές αλλά να βασίζεται στα γεγονότα, να θεωρείς δηλαδή, σαν δάσκαλο την εμπειρία. Αν περιοριστούμε, όμως, μόνο σ' αυτό θα αδικήσουμε το περιεχόμενο του όρου **πειραματική μέθοδος**, που συμβαίνει να είναι πλουσιότερο. Προχωρώντας περισσότερο προς το κέντρο αυτής της έννοιας θα πρέπει πρώτα να αποσαφηνίσουμε τους όρους **πείραμα και παρατήρηση.**

Στο θέμα αυτό ο ρόλος του Γαλιλαίου υπήρξε καταλυτικός. Με μια γενίκευση, η οποία δεν είναι πάντα πρέπουσα αλλά μερικές φορές είναι εξυπηρετική, μπορούμε να πούμε ότι ενώ πριν από τη Γαλιλαιική εποχή ο ερευνητής παρατηρούσε τα φαινόμενα και την εξέλιξή τους με τα μάτια ενός θεατή, μετά τον Γαλιλαίο η παρατήρηση μετατράπηκε σε πείραμα. Ο ερευνητής δεν κάθεται απλώς να παρακολουθεί τη φύση να μιλάει αλλά και την ανακρίνει. Παίρνει μ' άλλα λόγια μια «συνέντευξη» από την πραγματικότητα. Αυτό είναι το πρώτο βήμα που θα ανοίξει το δρόμο για τη σύγχρονη αντίληψη για τη Φυσική. Το πείραμα, λοιπόν είναι η πραγματοποίηση μιας ερώτησης που απευθύνεται προς τη Φύση.

Αλλά στη μέθοδο για την οποία μιλάμε πρέπει να αποδώσουμε και ένα ακόμα χαρακτηριστικό πέρα από το πειραματική. **Είναι μια μέθοδος ποσοτική.** Το έργο μας δεν είναι απλά και μόνο να αφήνουμε την πέτρα και να διαπιστώνουμε ότι πέφτει. Το έργο μας είναι να παίρνουμε μετρήσεις, και να επεξεργαζόμαστε συστηματικά όλα τα μηνύματα που περιέχονται μέσα σ' αυτές.

Υπάρχει, τέλος, το ζήτημα της γλώσσας. Ο διάλογος με τη φύση γίνεται σε μια ειδική γλώσσα η οποία περιέχει έννοιες με αποσαφηνισμένη σημασία και χρησιμοποιεί και τα Μαθηματικά. Η πειραματική ποσοτική μέθοδος και η γλώσσα με τις έννοιες και τα Μαθηματικά αποτελούν τα βασικά χαρακτηριστικά της Φυσικής.

Η «εικόνα» που δεσπόζει στη φαντασία των ανθρώπων, παρουσιάζει τη Φυσική επιστήμη σαν ένα σύνολο από γνώσεις που αυξάνονται αδιάκοπα και συσσωρευτικά, περιτυλιγμένες μέσα στο μύθο του αλάθητου και της απόλυτης εγκυρότητας. Ταυτόχρονα την εμφανίζει να αναπτύσσεται ανεξάρτητα από τα κοινωνικά συμβαίνοντα και να αποτελεί αποκλειστικά και μόνο έναν παράγοντα προόδου την ανθρωπότητας. Ας δούμε κάθε ένα από αυτά τα κομμάτια της «εικόνας» ξεχωριστά.

α. Η Φυσική επιστήμη δεν είναι ένα σύνολο από γνώσεις ασύνδετες. Ανάμεσά τους υπάρχει κάποια συνοχή. Οι γνώσεις διαπλέκονται, συσχετίζονται, θεμελιώνονται πάνω σε άλλες γνώσεις και σε ιδέες γενικότερες, συνθέτουν ένα οικοδόμημα χτισμένο πάνω στις κυρίαρχες αντιλήψεις κάθε κοινωνίας και κάθε εποχής.

Η ιστορία των Επιστημών μας διδάσκει ότι οι επιστημονικές θεωρίες –όπως και κάθε άλλο ανθρώπινο κατασκεύασμα– είναι οντότητες ιστορικές με γέννηση ακμή και τέλος και με συμμετοχή όχι μόνο στο σωστό αλλά και στο λάθος. Η πορεία της επιστήμης δεν υπήρξε μια ομαλή διαδικασία κατά την οποία η καινούργια γνώση

απλά συσσωρευόταν πάνω στην παλιά. Η τροχιά που διέγραψε και εξακολουθεί να διαγράφει η Φυσική επιστήμη μέσα στην ιστορία των ανθρώπων είναι ένα φαινόμενο πολύ πιο σύνθετο, κατά το οποίο εμφανίστηκαν βαθιά ρήγματα και τολμηρές απορρίψεις ιδεών που είχαν την ισχύ του αδιαμφισβήτητου.

β. Η Φυσική επιστήμη δεν αναπτύσσεται ανεξάρτητα από την υπόλοιπη ανθρώπινη δραστηριότητα. Αντίθετα, αποτελεί *μία* από τις κοινωνικές πρακτικές και είναι ανεξίτηλα σημαδεμένη από τη μορφή της κοινωνίας στην οποία γεννήθηκε και αναπτύχθηκε. Στη σύντομη σχετικά διαδρομή της επηρεάστηκε αλλά και επηρέασε όλες τις άλλες ανθρώπινες πρακτικές. Ιδιαίτερα στενή υπήρξε και εξακολουθεί να είναι η σχέση της με την Τεχνική. Η Τεχνική –και όχι μόνο αυτή– αποτελεί τόσο την προϋπόθεση όσο και τη συνέπεια της Επιστήμης. Προϋπόθεση γιατί η ανάπτυξη της Φυσικής έχει την ανάγκη της βελτίωσης των μέσων έρευνας και συνέπεια γιατί η Τεχνική, για να προχωρήσει, χρειάζεται τα συμπεράσματα των επιστημονικών αναζητήσεων.

γ. Τις τελευταίες δεκαετίες, οι ίδιοι οι επιστήμονες έχουν αρχίσει να κριτικάρουν την επιστήμη τόσο από τη σκοπιά της χρήσης όσο και από την άποψη της απόλυτης εγκυρότητας. Κριτικάρουν την επιστήμη για τη σχέση της με την κατασκευή των τρομακτικών πολεμικών όπλων που εμφανίστηκαν στον αιώνα μας και για τις συνέπειες που επιφέρει η αλόγιστη χρήση της στην καταστροφή του περιβάλλοντος. Στο μεταξύ η επιστήμη εξακολουθεί να χαρακτηρίζεται από μια υπερβολική υπεροψία και από μια πίστη στις δυνατότητές της να αφομοιώσει το σύνολο της γνώσης και να επιβάλει «γραμμές πλεύσεως» στην ίδια μας τη νόηση και στο σύνολο του πολιτισμού μας. Καθώς κυλούν τα χρόνια η εξάρτησή μας από αυτήν γίνεται ολοένα μεγαλύτερη. Αυτό μας δημιουργεί την ανάγκη τουλάχιστον να εξοικειωθούμε μαζί της όσο είναι δυνατόν. **Κι όχι μονάχα για να μάθουμε αλλά και για να σχηματίσουμε γνώμη, ώστε να την κρίνουμε.** Γιατί ενώ είναι απόλυτα «ανθρώπινο» να μας δημιουργεί δέος καθώς την παρακολουθούμε να σκαρφαλώνει τους γαλαξίες και να κατεβαίνει στα σπλάχνα του ατομικού πυρήνα επιδιώκοντας να σχεδιάσει το πρόσωπο της πραγματικότητας, ας μην ξεχνάμε ότι οφείλουμε ταυτόχρονα να κρατάμε απέναντί της μια στάση κριτική. Εξάλλου και το πρόσωπο της πραγματικότητας το οποίο μας προβάλλει σε κάθε εποχή, είναι, όπως είπαμε, αδιάκοπα μεταβαλλόμενο χωρίς ποτέ να έχει την απόχρωση μιας αλήθειας τελειωμένης και αμετακίνητης.

Ο χώρος και ο χρόνος



Ο χώρος. Πόσο απέχει; • Μια κοινή μονάδα μέτρησης • Η μέτρηση στην πράξη •Από τα μικρά στα μεγάλα • Πού; • Στη γλώσσα των Μαθηματικών • **Ο χρόνος.** Πόσο διαρκεί; • Το δευτερόλεπτο • Πότε; • Ρολόι και χρονόμενο • **Να θυμηθούμε** • **Να αναρωτηθούμε** • **Να λύσουμε προβλήματα. Ντοκουμέντο.**

Ο χώρος

Πόσο απέχει;

Ο χώρος θεωρείται έννοια πρωταρχική. Αυτό θα πει ότι δεν ορίζεται από άλλες έννοιες. Μπορούμε, όμως, να τον κατανοήσουμε μέσα από τη συναίσθηση που μας δημιουργεί η διαφορετική θέση των αντικειμένων. Τα αντικείμενα «βρίσκονται» στο χώρο και «απέχουν» μεταξύ τους. Τα πρώτα ερωτήματα είναι: **πόσο απέχουν;** και **που βρίσκονται;**

Ας δούμε πρώτα το ζήτημα της απόστασης. Για να δώσουμε απάντηση στο ερώτημα πόσο απέχουν δύο αυγά που βρίσκονται στο τραπέζι, εκείνο που μπορούμε να κάνουμε είναι να υπολογίσουμε *πόσες φορές* η μεταξύ τους απόσταση είναι μεγαλύτερη –η μικρότερη– από κάποια άλλη απόσταση. Δηλαδή να μετρήσουμε. Η άλλη απόσταση θα είναι η μονάδα μετρήσεως. Αυτή μπορεί να είναι η απόσταση των δύο άκρων ενός μολυβιού, που θα τη λέμε μήκος του μολυβιού.

Μπορούμε φυσικά να χρησιμοποιήσουμε και το μήκος ενός συνδετήρα ή και κάποιου άλλου αντικειμένου, που κατά τη διατύπωση του συμπεράσματος θα το αναφέρουμε. Σε γλώσσα μεγαλύτερης αυστηρότητας αυτό που μετρήσαμε ήταν η απόσταση δύο σημείων. Υπολογίσαμε δηλαδή ότι το τάδε σημείο του ενός αυγού απέχει τόσα μήκη συνδετήρα από ένα ορισμένο σημείο του άλλου αυγού.

Μια «κοινή» μονάδα μετρήσεως

Θα μπορούσε ο καθένας μας να έχει την «προσωπική» του μονάδα μετρήσεως. Βασικές όμως ανάγκες, που σχετίζονται με την οικονομία, αλλά και με τη γενικότερη επικοινωνία των ανθρώπων, επιβάλλουν το αντίθετο.

Από την εποχή των πρώτων μετρήσεων μέχρι σήμερα όλες οι κοινωνικές ομάδες αναζήτησαν μια κοινή μονάδα για τις μετρήσεις τους. Μονάδες που σχετίζονταν με το ανθρώπινο σώμα και την ανθρώπινη κίνηση χρησιμοποιήθηκαν για χιλιετίες ολόκληρες, περίπου αποκλειστικά. Το πόδι, το βήμα, ο βραχίονας έπαιξαν το ρόλο τους με διάφορες παραλλαγές μέσα σε μια λογική, στο κέντρο της οποίας βρισκόταν ο άνθρωπος. Οι Έλληνες, όπως φαίνεται στον

Ξενοφώντα, χρησιμοποίησαν τον πόδα, το στάδιο, το πλέθρο και τον παρασάγγη, ενώ οι Ρωμαίοι το μίλι δηλαδή την απόσταση που αντιστοιχούσε σε χίλια διπλά βήματα.

Μια πρόταση σε διαφορετική λογική έγινε από τους Γάλλους στη δεκαετία του 1730. «Να θεωρηθεί σαν μονάδα το μήκος ενός απλού εκκρεμούς, το οποίο στον ισημερινό χτυπάει τα δευτερόλεπτα». Η πρόταση, που από τη μια ξέφευγε από την ανθρωποκεντρική αντίληψη και από την άλλη θύμιζε τη σχέση του χώρου με τον χρόνο και την κίνηση, ποτέ δεν υιοθετήθηκε.

Η μονάδα **μέτρο μήκους (1m),** που χρησιμοποιούμε σήμερα, ξεκίνησε πάλι από τους Γάλλους στη δεκαετία του 1790 και σχετιζόταν με τις καινούριες ιδέες που επικράτησαν με τη Γαλλική Επανάσταση. Η βάση για τον ορισμό της καινούριας τότε μονάδας ήταν και πάλι πέρα από τον άνθρωπο. Ήταν η ίδια, η Γη. Η πρόταση ήταν να μετρηθεί το τόξο ενός μεσημβρινού και η νέα μονάδα να οριστεί σαν ένα *δεκαδικό* κλάσμα αυτής της απόστασης. Η μονάδα που προτάθηκε ήταν το ένα δεκάκις εκατομμυριοστό της απόστασης του Βόρειου Πόλου από τον Ισημερινό και ονομάστηκε *μέτρο μήκους*. Μια επιτροπή της Εθνοσυνέλευσης συγκρότησε μια συνολική πρόταση, που περιείχε και τη μονάδα μάζας (ένα χιλιόγραμμο) και αποτελούσε το λεγόμενο *μετρικό σύστημα μονάδων*.



Το μέγεθος των αντικειμένων

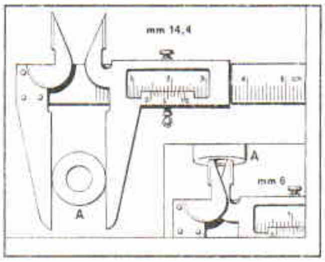
Ο όρος μήκος αναφέρεται συνήθως σε ένα αντικείμενο. Υπονοεί την απόσταση δύο ορισμένων σημείων του και μας βοηθάει να περιγράψουμε το μέγεθός του

Το μήκος ενός φερμουάρ είναι η βασική πληροφορία για το μέγεθός του. Όταν, όμως, ένας σπουργίτης ανοίξει τις φτερούγες του, το μέγεθός του περιγράφεται όχι μόνο από το άνοιγμά τους, αλλά και από την απόσταση ράμφους-ουράς. Εκτός από το μήκος, η καθημερινή γλώσσα χρησιμοποιεί κι άλλες λέξεις όπως είναι το πάχος, το πλάτος, το ύψος. Κάθε μία όμως από αυτές δεν υπονοεί τίποτε άλλο από την απόσταση ανάμεσα σε δύο σημεία.

Στον γεωμετρικό χώρο το μέγεθος μιας επιφάνειας εκφράζεται με το εμβαδόν της και το μέγεθος ενός γεωμετρικού σώματος με τον όγκο του. Ως μονάδα για τη μέτρηση του εμβαδού θεωρούμε ένα τετράγωνο πλευράς ενός μέτρου ($1m^2$). Για τη μέτρηση του ό-

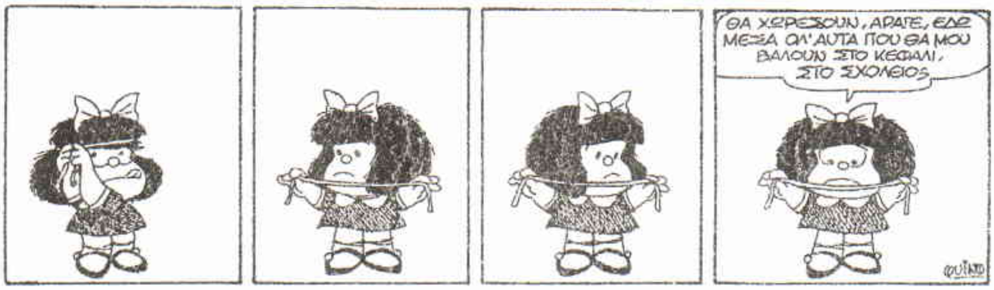
γκου χρησιμοποιούμε το ένα κυβικό μέτρο δηλαδή έναν κύβο με ακμή ενός μέτρου ($1m^3$).

Η μέτρηση στην πράξη



Θέλουμε να μετρήσουμε τις διαστάσεις της βιβλιοθήκης μας. Παίρνουμε μια μεζούρα και μετράμε άμεσα. Κάτι ανάλογο μπορούμε να κάνουμε για ένα οικόπεδο χρησιμοποιώντας μια μετροταινία. Για το πάχος ενός σύρματος ή για την εσωτερική διάμετρο ενός σωλήνα χρειαζόματε ειδικά όργανα, όπως για παράδειγμα το διαστημόμετρο.

Συναντάμε βέβαια και πολλές περιπτώσεις στις οποίες δεν είναι δυνατόν να μετρήσουμε άμεσα, οπότε καταφεύγουμε σε μεθόδους έμμεσες, στις οποίες εκτός από τη γεωμετρία και την τριγωνομετρία μπορούν να μας εξυπηρετήσουν και οι νόμοι της φυσικής.

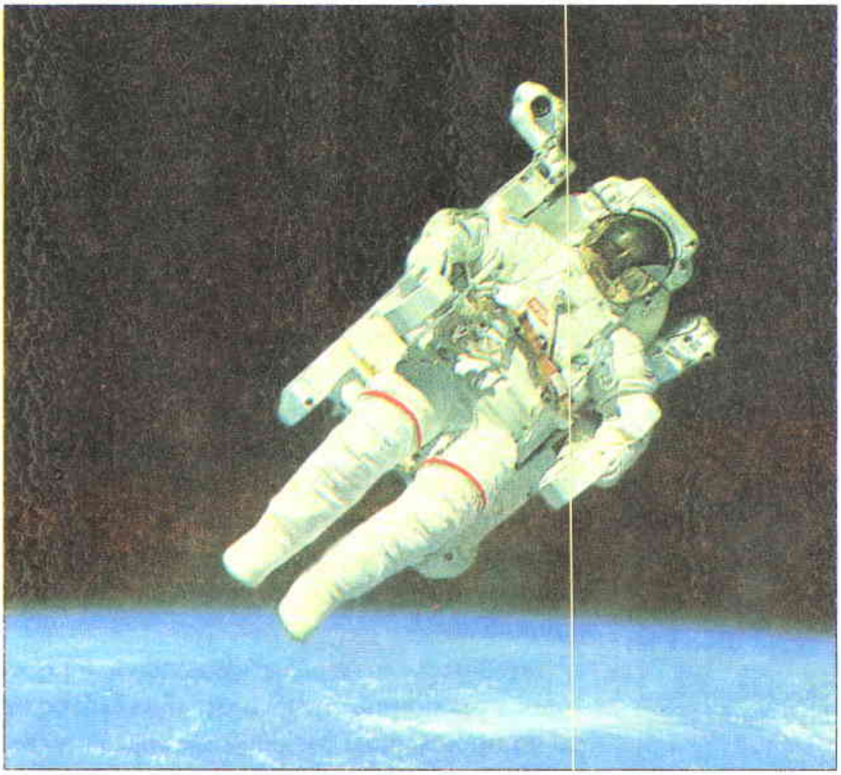


Από τα μικρά στα μεγάλα

Χίλια μέτρα μάς κάνουν ένα χιλιόμετρο (1 km), ενώ το χιλιοστό του μέτρου συμβολίζεται 1mm και το εκατοστό 1 cm. Η κλίμακα από το mm μέχρι το km μπορεί να περιγράψει ικανοποιητικά αποστάσεις και διαστάσεις αντικειμένων πάνω στη Γη. Μια σελίδα βιβλίου έχει πάχος 0,1 mm, το ύψος των ανθρώπων είναι κάπου ενάμιση με δύο μέτρα, ενώ τα ταξίδια μας γίνονται σε αποστάσεις που μετριούνται με χιλιόμετρα. Το μέγεθος όμως των μικροτάτων ατόμων είναι δύσκολο να γίνει αντιληπτό. Η διάμετρός τους είναι κάπου 10^{-10} mm και δεν είναι απλό να κατανοήσουμε τι σημαίνει αυτό το νούμερο. Ανάλογη αμηχανία αισθανόμαστε μπροστά στο μέγεθος της Γης. Θα μπορούσε, ίσως, να μας βοηθήσει η σύγκριση με κάποιο μέγεθος

που μας είναι οικείο. Ένα γράμμα της σελίδας του βιβλίου αυτού είναι 10.000.000.000 φορές μεγαλύτερο –κατά τη μία του διάσταση– από τη διάμετρο του ατόμου, ενώ ταυτόχρονα είναι 10.000.000.000 φορές μικρότερο από τη διάμετρο της Γης.

Το άτομο, το γράμμα της σελίδας, ο άνθρωπος, η Μεγάλη Πυραμίδα, η Γη. Γίνεται έτσι φανερό πόσο σχετική είναι μια εκτίμηση τόσο για το μεγάλο, όσο και για το μικρό.



Ας απομακρυνθούμε όμως για λίγο και από τη Γη. Είναι γνωστό πως η προηγούμενη γενιά το κατάφερε. Οι διαστάσεις εδώ είναι τόσο μακριά από τις καθημερινές εμπειρίες μας, που οι οποιοιδήποτε αριθμοί δεν επαρκούν στο να τις κατανοήσουμε. Ίσως θα μας βοηθούσε το να φτιάξουμε με τη φαντασία μας ένα μοντέλο σμικρύνοντας το πλανητικό σύστημα. Στο μοντέλο αυτό υπό κλίμακα $1:10^{10}$ ο Ήλιος είναι ένα τόπι με διάμετρο 14 εκατοστά. Σε απόσταση 10 μέτρων σαν ένα κεφάλι καρφίτσας περιφέρεται γύρω του η Γη. Ο Δίας είναι ένα κεράσι στα 78 μέτρα απόσταση ενώ ο τελευταίος από τους εννέα πλανήτες, ο Πλούτωνας, βρίσκεται

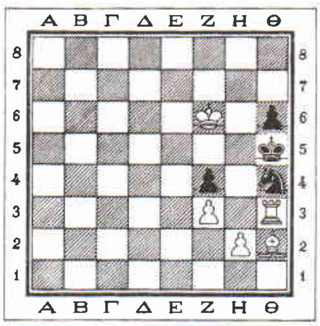
590 μέτρα μακριά.

Η όλη εικόνα αφήνει μια αίσθηση «ερημιάς». Η αίσθηση ενισχύεται, αν θελήσουμε να αναζητήσουμε την επόμενη μικρή μπάλα. Είναι το Άλφα του Κενταύρου σε απόσταση 4.300 χιλιόμετρα από την κεντρική «μπάλα» της δικής μας γειτονιάς.

Πού;

Τα αντικείμενα βρίσκονται στο χώρο. Καθένα από αυτά βρίσκεται *κάπου*.

Για να περιγράψουμε *που βρίσκεται* ένα γειτονικό μας αντικείμενο, αρχικά επιστρατεύουμε τα τρία γνωστά ζευγάρια (α) μπρος-πίσω (β) πάνω-κάτω και (γ) δεξιά-αριστερά. Καθένα από τα ζευγάρια αντιστοιχεί και σε μια κατεύθυνση. Καθώς παρακολουθούμε ένα έργο στο θέατρο, πάνω αριστερά κρέμεται μία λάμπα, μπρος δεξιά βρίσκεται τώρα ο πρωταγωνιστής ενώ ακριβώς πίσω μας ένας ακόμα θεατής παρακολουθεί αμίλητος. Σ' αυτή την περιγραφή ο εαυτός μας αποτελεί το **σύστημα αναφοράς.**



Για τον ακριβή εντοπισμό μιας θέσης απαιτούνται δύο πληροφορίες, εφόσον είναι δεδομένο ότι το αντικείμενό μας βρίσκεται σε μία ορισμένη επιφάνεια. Η θέση του μαύρου βασιλιά πάνω στη σκακιέρα του σχήματος προσδιορίζεται με ένα γράμμα, το Θ, και έναν αριθμό, το 5, ο άσπρος βασιλιάς βρίσκεται στη θέση «Ζ6» και στη «Θ4» το μαύρο άλογο.

Στο βιβλίο του *Περί Μεθόδου Λόγος* ο Καρτέσιος (1596-1650) παρουσίασε την ιδέα ότι «ένα ζεύγος αριθμών μπορεί να προσδιορίσει τη θέση ενός σημείου πάνω σε μια επιφάνεια». Οι δύο αυτοί αριθμοί θα αντιστοιχούν στις αποστάσεις του σημείου από δύο άξονες. Φυσικά για τον χώρο των τριών διαστάσεων, οι αριθμοί θα είναι τρεις, όσες και οι αντίστοιχες αποστάσεις από τρία επίπεδα.

Ο Charles Singer αναφερόμενος στις συνθήκες που οδήγησαν τη σκέψη του Καρτέσιου σ' αυτή την εντελώς καινούργια ιδέα, γράφει: «*Ξαπλωμένος στο κρεβάτι του, όπως συνήθιζε, παρατηρούσε μια μύγα που πέταγε μέσα στο δωμάτιο. Αναζητώντας έναν τρόπο με τον οποίο θα μπορούσε να προσδιορίζει τη θέση της σε κάθε στιγμή, συνέλαβε την ιδέα ότι η θέση της μύγας θα μπορούσε να δίνεται με τρεις αριθμούς. Τις τρεις αποστάσεις από τα επίπεδα των*

δύο προσκείμενων τοίχων και το επίπεδο του ταβανιού».

Η ιδέα είχε σοβαρό αντίκτυπο. Άνοιγε το δρόμο για να περάσει η έννοια της κίνησης σ' ένα χώρο γεωμετρικό. Σήμερα, για να προσδιορίσουμε τη θέση ενός σημείου στον χώρο, χρησιμοποιούμε ένα τρισορθογώνιο σύστημα αξόνων ή ένα ορθογώνιο σύστημα, όταν το σημείο βρίσκεται διαρκώς σε ένα μόνο επίπεδο.

Στη γλώσσα των μαθηματικών

Για να προσδιορίσουμε με ακρίβεια το *που βρίσκεται ένα αντικείμενο* οφείλουμε να αντικρίσουμε τον χώρο με τον τρόπο που τον βλέπει η Γεωμετρία. Οι έννοιες, σημείο, ευθεία και επίπεδο μάς είναι δηλαδή απαραίτητες. Στη γλώσσα των μαθηματικών μπορούμε να προσδιορίσουμε τις θέσεις αντικειμένων των οποίων οι διαστάσεις θωρούνται ασήμαντες σε σχέση με εκείνες των άλλων σωμάτων οπότε και θα τα χαρακτηρίζουμε *«σημειακά αντικείμενα»*. Σύμφωνα με αυτή τη θεώρηση μπορούμε να φανταζόμαστε ότι ένα σημειακό αντικείμενο θα βρίσκεται, κάθε στιγμή, σε ένα σημείο του χώρου.

1. Σημειακό αντικείμενο πάνω σε μία ευθεία

Υποθέτουμε ότι ένα αντικείμενο βρίσκεται διαρκώς πάνω στην ίδια ευθεία στην οποία δίνουμε το όνομα ΑΒ. Πάνω στην ευθεία αυτή μπορούμε να κινηθούμε είτε από το Α προς το Β είτε αντίθετα. Αν τη μία από τις δύο κατευθύνσεις τη θεωρήσουμε, αυθαίρετα, σαν θετική και την παραστήσουμε με ένα βέλος, λέμε ότι η ευθεία είναι προσανατολισμένη. Το *που βρίσκεται* το σημειακό μας αντικείμενο –ας το ονομάσουμε Μ– θα προσδιορίζεται από τη συντεταγμένη του (γεωμετρικού) σημείου στο οποίο βρίσκεται το αντικείμενο. Η συντεταγμένη αυτή ονομάζεται **θέση** του αντικειμένου και συμβολίζεται με το γράμμα x.



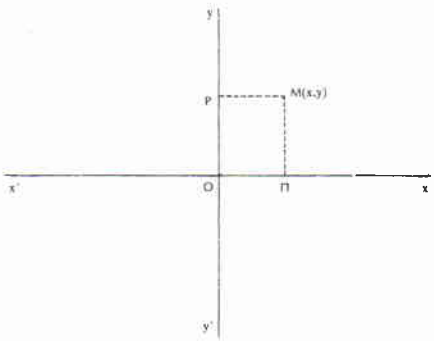
Το x θα είναι θετικό αν το αντικείμενο βρίσκεται σε σημείο του θετικού ημιάξονα και αρνητικό στην αντίθετη περίπτωση. Ο άξονας x' Ox αποτελεί το σύστημα αναφοράς για τη θέση των αντικειμένων που βρίσκονται διαρκώς πάνω του.

Το x θα είναι θετικό αν το αντικείμενο βρίσκεται σε σημείο του

θετικού ημιάξονα και αρνητικό στην αντίθετη περίπτωση. Ο άξονας x' Ox αποτελεί το σύστημα αναφοράς για τη θέση των αντικειμένων που βρίσκονται διαρκώς πάνω του.

2. Σημειακό αντικείμενο πάνω σε ένα επίπεδο

Υποθέτουμε τώρα ότι το αντικείμενο Μ βρίσκεται διαρκώς πάνω στην ίδια επίπεδη επιφάνεια. Για να προσδιορίσουμε το *που βρίσκεται* χρειαζόμαστε πάντα ένα σύστημα αναφοράς. Αποδεχόμαστε την πρόταση του Καρτέσιου και θεωρούμε δύο άξονες κάθετους μεταξύ τους με κοινή αρχή Ο. Τον x' Ox και τον y'Oy. Από το σημείο που βρίσκεται το Μ φέρνουμε τις κάθετες στους δύο άξονες που τους τέμνουν αντίστοιχα στα σημεία Π και Ρ.



Η συντεταγμένη x του σημείου Π (ονομάζεται τετμημένη του Μ) και η συντεταγμένη y του σημείου Ρ (ονομάζεται τεταγμένη του Μ), θεωρούμενες κατά τη διάταξη (x,y), λέγονται συντεταγμένες του Μ στο σύστημα αξόνων xOy. Το Μ, λοιπόν προσδιορίζεται από τις δύο συντεταγμένες του, γι' αυτό και γράφουμε Μ(x, y),

Οι δύο άξονες x'Ox και y'Oy αποτελούν ένα ορθογώνιο «καρτεσιανό» σύστημα αναφοράς xOy. Όσο για τις συντεταγμένες x και y, έχει επικρατήσει να χαρακτηρίζονται καρτεσιανές.

Ο χρόνος

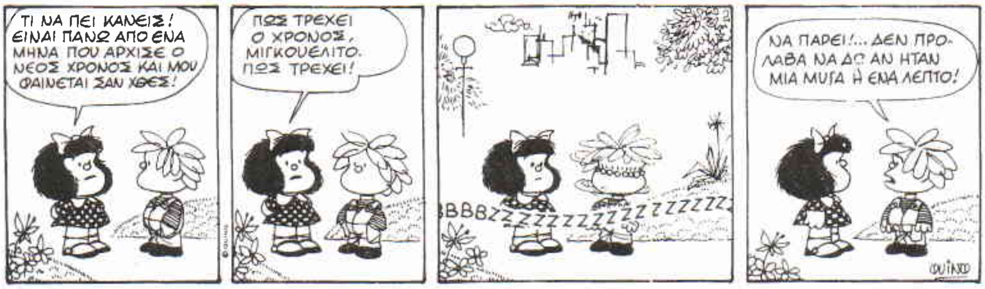
Και ο χρόνος γλύπτης των ανθρώπων
παράφορος

Οδυσσέας Ελύτης

Από όλες τις έννοιες της φυσικής ο χρόνος εμφανίζεται συχνότερα τόσο στη σκέψη μας όσο και στα καθημερινά μας λεξιλόγια. Η έννοια *χρόνος* είναι και αυτή πρωταρχική. Δημιουργείται από τη συναίσθηση της διαδοχής των γεγονότων. Τα βασικά ερωτήματα εδώ είναι το **πότε;** και το **πόσο διαρκεί;** Το να απαντήσουμε στο πρώτο σημαίνει **να προσδιορίσουμε μια χρονική στιγμή** ενώ το δεύτερο μας βάζει **να μετρήσουμε μια χρονική διάρκεια.** Η ίδια η Γραμματική της γλώσσας μας χρησιμοποιεί τον Αόριστο για κάτι που έγινε σε κάποια στιγμή και τον Παρατατικό για κάτι που γινόταν. Όσο για τα μελλούμενα να συμβούν, διαθέτει πάλι δύο «χρόνους» που ενώ διατυπώνονται και οι δυο με το *θα*, αντιδιαστέλλουν πράξεις, όπως το *θα κοιτάξω* για μια στιγμή από το *θα κοιτάζω* επί μια ορισμένη χρονική διάρκεια. Ας δούμε όμως πρώτα το ζήτημα της μέτρησης μιας χρονικής διάρκειας.

Πόσο διαρκεί;

Καθώς ενηλικιωνόματε, γρήγορα διακρίνουμε στον χρόνο τα δύο βασικά του γνωρίσματα. Από τη μια ότι κυλάει ασταμάτητα σαν ένα ποτάμι χωρίς επιστροφή και από την άλλη ότι η ροή του σε πολλά φαινόμενα γίνεται με ρυθμούς φαινομενικής «κανονικότητας». Η ανακύκλωση των εποχών, που συνειδητοποίησε ο πρόγονός μας από τότε που άρχισε να γίνεται γεωργός, είναι ένας από τους βασικότερους ρυθμούς ο οποίος επηρεάζει σημαντικά τη ζωή στον πλανήτη μας. Στο μεταξύ πολύ νωρίτερα είχε γίνει αντιληπτό ότι η εμφάνιση του ήλιου κατά την αυγή παρουσιάζει μια ακόμα κανονικότητα. Μια από τις πρώτες αγωνίες του μακρινού μας προγόνου ήταν «να εξασφαλίσει» ότι οι χρονικοί ρυθμοί θα συνεχίζονταν αναλλοίωτοι και ότι οι αυγές και οι εποχές θα ξανάρχονταν με σταθερούς ρυθμούς, ακόμα κι αν οι αγριοκερασιές συνέβαινε να αργήσουν να ανθίσουν κάποια άνοιξη.



Όλα τα φαινόμενα, που επαναλαμβάνονται με αναλλοίωτους ρυθμούς, τα λέμε περιοδικά και τη χρονική διάρκεια, που απαιτείται για κάθε επανάληψη, τη λέμε **περίοδο.** Η περίοδος είναι στοιχείο ταυτότητας ενός περιοδικού φαινομένου. Ένα άλλο μέγεθος, που περιγράφει την περιοδικότητα με αντίστροφη λογική, είναι η **συχνότητα.** Μας πληροφορεί για το πόσες φορές επαναλαμβάνεται το φαινόμενο σε μία μονάδα χρόνου. Ορίζεται ως πηλίκο του αριθμού των επαναλήψεων σε ορισμένο χρόνο (διάρκεια) προς τον χρόνο αυτό.

Ένα οποιοδήποτε περιοδικό φαινόμενο, όπως οι μεταβολές στο ουράνιο στερέωμα, οι ρυθμοί του ανθρώπινου σώματος, η κίνηση του εκκρεμούς και το άδειασμα της κλεψύδρας, μπορούμε να το χρησιμοποιήσουμε για να επινοήσουμε μία μονάδα χρόνου και να μετρήσουμε μια χρονική διάρκεια. Μπορούμε, για παράδειγμα, να μετρήσουμε ότι μια διαφήμιση στην τηλεόραση διήρκεσε 11 σφυγμούς ή ότι το ασανσέρ για να φτάσει στον τέταρτο όροφο χρειάστηκε οκτώ πλήρεις αιωρήσεις ενός εκκρεμούς.

Το δευτερόλεπτο

Η μονάδα μετρήσεως που χρησιμοποιεί η επιστήμη για τη χρονική διάρκεια είναι το **ένα δευτερόλεπτο** (1 s), που ξεκίνησε σαν ένα συγκεκριμένο κλάσμα του ημερονυχτίου. Οι Βαβυλώνιοι μάθανε τους Έλληνες να χωρίζουν το χρόνο, σε ίσα διαστήματα. Η διαίρεση αυτή πέρασε από τους Έλληνες στους άλλους ευρωπαϊκούς λαούς. Στο μεταξύ, η λογική της διαίρεσης σε 60 και όχι σε δέκα ή σε κάποιο άλλο δεκαδικό πολλαπλάσιο διέσχισε τους αιώνες αναλλοίωτη και έφτασε μέχρις εμάς. Συνεχίζουμε να υποδιαιρούμε την ώρα σε 60 πρώτα λεπτά (min) και κάθε πρώτο λεπτό σε 60 δευτερόλεπτα.

Εφόσον η ημέρα έχει 24 ώρες, το 1 s είναι ίσο με το 1/86.400

της ημέρας. Στα 1820 μία επιτροπή Γάλλων επιστημόνων πρότεινε να υπολογιστεί ο μέσος όρος διάρκειας μιας μέρας σε όλο το έτος και να οριστεί το 1 s σαν το κλάσμα 1/86.400 της μέσης ηλιακής μέρας που θα προκύψει. Ο νέος αυτός ορισμός διατηρήθηκε πάνω από έναν αιώνα. Το 1964 στη Δωδέκατη Γενική Συνδιάσκεψη Μέτρων και Σταθμών που έγινε στο Παρίσι ένας νέος ορισμός για το δευτερόλεπτο, που βασίζεται στο ατομικό ρολόι καισίου, υιοθετήθηκε προσωρινά.

Πότε;

Όταν μας ρωτούν *πότε;* μας ζητούν να προσδιορίσουμε κάποια χρονική στιγμή. Ενώ η απάντηση στο ερώτημα *που;* χρειάζεται τρεις αριθμούς (στη γενική περίπτωση), ο προσδιορισμός του *πότε* έχει ανάγκη από μία μόνο τιμή. Την τιμή της χρονικής διάρκειας, η οποία παρεμβάλλεται ανάμεσα σε μία χρονική στιγμή, που έχουμε συμφωνήσει να είναι αρχή των χρόνων, και τη χρονική στιγμή που θέλουμε να προσδιορίσουμε. Όταν ακούγεται στο ραδιόφωνο *ώρα Ελλάδας 17.00*, υπονοείται ότι έχει παρεμβληθεί χρονική διάρκεια 17 ωρών από τη χρονική στιγμή, που λέγεται μεσάνυχτα. Τα μεσάνυχτα θεωρούνται αρχή των χρόνων για τον προσδιορισμό κάθε στιγμής στη διάρκεια του εικοσιτετραώρου.

Εννοείται ότι για την πειραματική μελέτη ενός φαινομένου μπορούμε να θεωρούμε σαν αρχή χρόνων μια οποιαδήποτε χρονική στιγμή, την οποία θα επιλέξουμε αυθαίρετα.

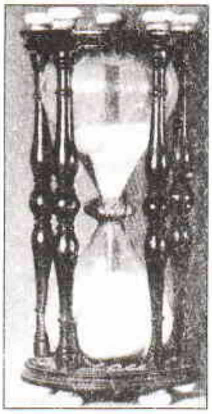
Η χρονική στιγμή συμβολίζεται με το γράμμα t, ενώ η χρονική διάρκεια ανάμεσα σε δύο στιγμές t_1 και t_2 συμβολίζεται με Δt, όπου $\Delta t = t_2 - t_1$.

Ρολόι και χρονόμετρο



Ένα χρονόμετρο χεριού μάς είναι απαραίτητο για την πειραματική μελέτη της κίνησης μέσα στο εργαστήριο. Το χρονόμετρο μπορεί να δώσει απάντηση μόνο στο ερώτημα *πόσο διαρκεί;*

Το ηλιακό ρολόι, όμως, είναι ίσως, το πρώτο ρολόι της ιστορίας και φαίνεται να ξεκίνησε από τους Βαβυλώνιους 2.500 χρόνια πριν από σήμερα. Ήταν ένα τριγωνικό σίδερο



στερεωμένο κατακόρυφα πάνω στο έδαφος, έτσι που, όταν ο ή-λιος διέγραφε την τροχιά του στον ουρανό, η σκιά του κινιόταν σαν δείκτης και έδειχνε την ώρα. Πανάρχαιο ρολόι είναι και η κλε-ψύδρα, ένα όργανο, που έδειχνε το πέρασμα του χρόνου με τη ροή (μέσα από μια μικρή τρύπα) νερού ή άμμου από ένα δοχείο σ' ένα άλλο.

Η λειτουργία της στηρίζεται στην παραδοχή ότι ίσες ποσότητες νερού ή άμμου χρειάζονται ίσους χρόνους για να περάσουν από τη μικρή τρύπα.

Τα μηχανικά ρολόγια έκαναν την εμφάνισή τους στην Ευρώπη 14 αιώνες μετά τον Χριστό. Δύο αιώνες αργότερα εμφανίστηκαν και τα ρολόγια πλατιάς κατανάλωσης τοποθετημένα στους τοίχους και στα καμπαναριά. Η κατασκευή ενός μηχανικού ρολογιού, που ρυθμιζόταν από εκκρεμές, πραγματοποιήθηκε για πρώτη φορά το 1657 από τον Ολλανδό Christiaan Huygens (Κρίστιαν Χόιχενς). Ο χρόνος άρχισε να μετριέται με μεγαλύτερη ακρίβεια.



Ερωτήσεις και προβλήματα



1.1. Η έννοια *χώρος:*
α) ορίζεται από άλλες έννοιες
β) γίνεται κατανοητή από τη συναίσθηση που δημιουργεί σε όλους μας η διαφορά θέσης των αντικειμένων
Με ποιο από αυτά συμφωνείτε;

1.2. Τι κάνουμε για να προσδιορίσουμε *πόσο απέχουν* δύο αντικείμενα;

1.3. Που βασίστηκαν κατά το παρελθόν οι ανθρώπινες κοινωνίες για να δημιουργήσουν κοινές μονάδες για τη μέτρηση των αποστάσεων;

1.4. Πώς ορίστηκε για πρώτη φορά η μονάδα *μέτρο μήκους;*

1.5. Σε τι διαφέρουν οι έννοιες *μήκος* και *απόσταση;*

1.6. Αν σμικρύνουμε το Σύμπαν 10.000.000.000 φορές
α) Ο Ήλιος θα είναι σαν ένα τόπι διαμέτρου 14 εκατοστών.
β) Η Γη θα είναι σαν ένα κεράσι που θα περιφέρεται σε απόσταση 10 μέτρων από το τόπι.
γ) Ο Πλούτων θα περιφέρεται σε απόσταση 590 μέτρων από το τόπι-Ήλιο.
δ) Αν το «τόπι-Ήλιος» βρίσκεται στην Ομόνοια, ο πιο κοντινός Ήλιος, το Άλφα του Κενταύρου, θα βρίσκεται σε απόσταση όσο η απόσταση Αθήνας-Θεσσαλονίκης.
Με ποια από αυτά συμφωνείτε;

1.7. Η θέση ενός σημείου σε ένα επίπεδο
α) προσδιορίζεται μόνο ως προς κάποιο σύστημα αναφοράς.
β) ως προς κάποιο σύστημα αναφοράς προσδιορίζεται εφόσον δοθούν τρεις τουλάχιστον πληροφορίες.
γ) προσδιορίζεται βάσει μιας ιδέας η οποία για πρώτη φορά διατυπώθηκε από τον Καρτέσιο.
Με ποια από αυτά συμφωνείτε;

1.8. Τι σημαίνει η φράση «Η θέση ενός σημειακού αντικειμένου είναι αρνητική»;

1.9. Πως γίνεται κατανοητή η έννοια *χρόνος* από τον άνθρωπο;

1.10. Τι εννοούμε λέγοντας ότι τόσο το 1m όσο και το 1s σχετίζονται με τη Γη;

1.11. Πως προσδιορίζεται το *πότε* ενός γεγονότος;



Να αναρωτηθούμε...

1.12. Το 1mm είναι ένα χιλιοστό του μέτρου. Το 1μm είναι το ένα εκατομμυριοστό του μέτρου. Πόσα mm είναι η διάμετρος ενός κατοστάρικου; Πόσα μm είναι η ακτίνα της Γης;

1.13. Πόσα τετραγωνικά μέτρα είναι το

πάτωμα της τάξης σας; Πόσα λίτρα νερού χωράνε στην τάξη σας;

1.14. Το ένα πόδι, το μήκος εκκρεμούς που χτυπάει τα δευτερόλεπτα, το μέτρο μήκους που προτάθηκε από τους Γάλλους στη δεκαετία του 1790 και το μέτρο μήκους όπως ορίστηκε στη Διεθνή Συνέλευση του 1960 (δες το σχετικό ντοκουμέντο) είναι τέσσερις μονάδες μήκους. Συζητήστε για τη λογική πάνω στην οποία βασίστηκε ο ορισμός κάθε μιας από αυτές.

1.15. Πόσες πληροφορίες χρειάζονται για να προσδιοριστεί η θέση:
α) μιας εξωλέμβιας; β) ενός τρένου; γ) ενός ελικοπτέρου;

1.16. Αν η θέση ενός σημειακού αντικειμένου είναι +7 cm, τότε η θέση ενός άλλου που απέχει από αυτό 10 εκατοστά θα είναι:
-3 cm
17 cm
-7 cm
Να σημειώσετε Σ (σωστό) ή Λ (λάθος) και να δικαιολογήσετε την απάντηση.
1.17. Να αναφέρετε τρία περιοδικά φαινόμενα των οποίων γνωρίζετε την περίοδο. Ποια είναι η περίοδος καθενός από αυτά;

1.18. .... ενός .... φαινομένου λέγεται το πηλίκο του αριθμού των επαναλήψεων σε ορισμένο χρόνο προς τον χρόνο αυτό, ενώ .... ενός παρόμοιου φαινομένου λέγεται ο ελάχιστος χρόνος ο απαιτούμενος για μια επανάληψη. Έτσι, αν ένα περιοδικό φαινόμενο επαναλαμβάνεται κάθε 4 δευτερόλεπτα η .... του θα είναι 4 δευτερόλεπτα, ενώ η συχνότητά του θα είναι .... Σας ζητούμε να συμπληρώσετε τα κενά.

1.19. Για ποιες από τις παρακάτω ερωτήσεις η απάντηση αναφέρεται σε χρονική στιγμή και για ποιες σε χρονική διάρκεια;
α) Πόσο παλιό είναι το σπίτι σου;
β) Πότε αρχίζει το ματς στην τηλεόραση;
γ) Πόσες ώρες κάνεις μάθημα την ημέρα;
δ) Τι ώρα έρχεται το τρένο;

Να λύσουμε προβλήματα

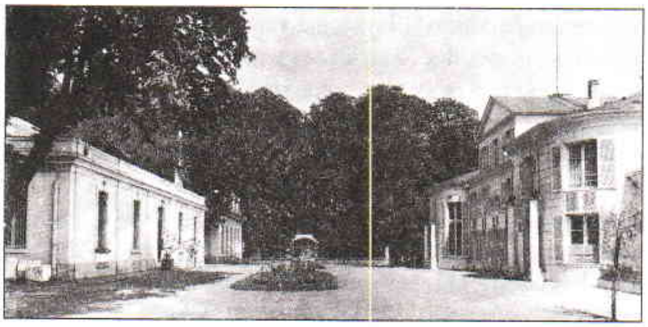


1.20. Σ' ένο ρολόι του τοίχου ο λεπτοδείκτης έχει μήκος 30 cm και ο ωροδείκτης 20 cm. Διαλέξτε ένα κατάλληλο ορθογώνιο σύστημα αξόνων και προσδιορίστε τις θέσεις των άκρων των δύο δεικτών όταν το ρολόι δείχνει ότι η ώρα είναι 10 ακριβώς.

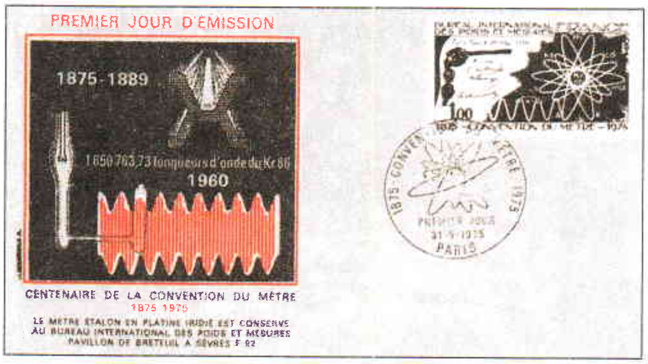
1.21. Τρεις μαθητές πειραματίζονται με ένα πρόχειρο εκκρεμές. Ο ένας από αυτούς φροντίζει να πραγματοποιούνται οι αιωρήσεις του εκκρεμούς, ενώ οι άλλοι δύο τις χρονομετρούν. Ο πρώτος διαθέτει χρονόμετρο και βρίσκει ότι το εκκρεμές κάνει 30 δευτερόλεπτα για 20 αιωρήσεις. Ο δεύτερος, χωρίς ρολόι, βρίσκει ότι για τις 80 αιωρήσεις του εκκρεμούς μέτρησε 120 σφυγμούς.
α) ποια είναι η περίοδος του εκκρεμούς;
β) Ποια είναι η περίοδος των σφυγμών του μαθητή;

Ντοκουμέντο

Τον 18ο αιώνα στις διάφορες περιοχές της Ευρώπης εξακολουθούσε να υπάρχει μια μεγάλη ποικιλία στις μονάδες μετρήσεως η οποία δυσκόλευε τόσο τις διεθνείς οικονομικές σχέσεις όσο και τη σύγκριση των αποτελεσμάτων των επιστημονικών ερευνών.



Η έπαυλη Μπρετέιγ (Pavillon Breteuil) στις Σέβρες κοντά στη νοτιοδυτική παρυφή του Παρισιού στην οποία στεγάζεται το Διεθνές Γραφείο Μέτρων και Σταθμών.



Το 1875 οι διπλωματικοί εκπρόσωποι 18 χωρών υπέγραψαν στο Παρίσι τη λεγόμενη «Σύμβαση του Μέτρου» με την οποία ιδρύθηκε και το Διεθνές Γραφείο Μέτρων και Σταθμών. Τα 100 χρόνια από τη Σύμβαση του Μέτρου γιορτάστηκαν με την έκδοση ειδικού γραμματόσημου. Πάνω στο φάκελο του σχήματος μπορούμε να διακρίνουμε και τη λυχνία Κρυπτού, το καινούριο πρότυπο.

Την περίοδο της Γαλλικής Επανάστασης ξεκίνησε μια συλλογική προσπάθεια με σκοπό την καθιέρωση κοινών μονάδων που θα ίσχυαν «για όλους τους λαούς και σε όλους τους καιρούς». Στα 1791 με απόφαση της Γαλλικής Εθνοσυνέλευσης η Ακαδημία Επιστημών όρισε μια επιτροπή αποτελούμενη από επιστήμονες –μεταξύ των οποίων ήταν ο Laplace και ο Lagrange– να μελετήσει το πρόβλημα των πρότυπων μονάδων. Στο ζήτημα της μονάδας μήκους η άποψη που επικράτησε στην επιτροπή ήταν «η μονάδα μήκους να είναι ανεξάρτητη από οποιοδήποτε άλλο μέγεθος και να βασίζεται σε μια φυσική σταθερά», όπως το μήκος του γήινου μεσημβρινού. Μία ειδική αποστολή ανέλαβε να μετρήσει την απόσταση Δουνκέρκης-Βαρκελώνης πάνω στον γήινο μεσημβρινό που περνάει από τον Αστεροσκοπείο του Παρισιού. Η επιχείρηση τέλειωσε το 1799, οπότε ορίστηκε για πρώτη φορά το πρότυπο μέτρο ως ένα «βολικό» κλάσμα –το ένα δεκάκις εκατομμυριοστό– της απόστασης του Βόρειου Πόλου από τον Ισημερινό. Οι αποστάσεις Δουνκέρκης-Πόλου και Βαρκελώνης-Ισημερινού υπολογίστηκαν με μετρήσεις γεωδαιτικές.

Η βελτίωση όμως των οργάνων και των μεθόδων μετρήσεων έδειξε ότι το πρότυ-

πο μέτρο ήταν κατά 0,2 mm μικρότερο του θεωρητικού. Ύστερα από το πρόβλημα που δημιουργήθηκε, θα έπρεπε ή να κατασκευαστεί καινούριο πρότυπο ή να διατηρηθεί το παλιό. Η κατασκευή όμως ενός καινούριου πρότυπου, που να συμφωνεί με τις νέες μετρήσεις, δεν αποτελούσε εγγύηση για την παραπέρα διατήρησή του, μια και οι ακριβέστερες μετρήσεις του μέλλοντος θα μπορούσαν να απαιτήσουν νέα αλλαγή στο πρότυπο. Ακριβώς για τον λόγο αυτό οι επιστήμονες οδηγήθηκαν στο να αποδεχθούν ένα αυθαίρετο πρότυπο σαν μονάδα μήκους: Στα 1903 υιοθετήθηκε σαν 1 μέτρο «Η απόσταση δυο χαραγών πάνω σε μία ράβδο από ιριδιούχο λευκόχρυσο σε 0° C». Το πρότυπο είχε κατασκευαστεί μερικά χρόνια νωρίτερα και από τότε φυλάσσεται στο Διεθνές Γραφείο Μέτρων και Σταθμών.

Το 1960 η Διεθνής Συνέλευση Μέτρων και Σταθμών υιοθέτησε για το μέτρο έναν καινούριο ορισμό: «1m είναι ένα μήκος ίσο με 1650763,73 μήκη κύματος στο κενό της ακτινοβολίας που εκπέμπει το στοιχείο Κρυπτό 86».

Το πρότυπο του μέτρου δεν είναι πια μία ράβδος από ιριδιούχο λευκόχρυσο, αλλά μια λυχνία αερίου Κρυπτού 86.
Τον Οκτώβριο του 1983 η Γενική Συνέλευση Μέτρων και Σταθμών πρότεινε έναν ορισμό για το μέτρο με βάση την ταχύτητα του φωτός. «Ένα μέτρο είναι η απόσταση που διανύει το φως σε χρόνο 1/299792458 του δευτερολέπτου». Η καινούρια πρόταση θυμίζει πιο καθαρά τη σχέση του χώρου με το χρόνο και την κίνηση.

Η περιγραφή της κίνησης

Η κίνηση • Η πολυπλοκότητα • **Η γλώσσα της περιγραφής** • Η έννοια *τροχιά* • Εξισώσεις κίνησης • Η έννοια *σύστημα αναφοράς* • Η έννοια *διάνυσμα* • **Κίνηση σε μια διάσταση** • Γενικά • Ευθύγραμμη ομαλή κίνηση • Η ταχύτητα • Η επιτάχυνση • Ευθύγραμμη κίνηση με σταθερή επιτάχυνση • **Η ελεύθερη πτώση** • Από τον Αριστοτέλη στον Γαλιλαίο • Ο νόμος της ελεύθερης πτώσης • **Καμπυλόγραμμες κινήσεις** • **Η ομαλή κυκλική κίνηση** • **Σύνθετες κινήσεις** • Η αρχή της ανεξαρτησίας • Οριζόντια βολή • **Να θυμηθούμε** • **Να αναρωτηθούμε** • **Να λύσουμε προβλήματα** • **Ντοκουμέντο.**

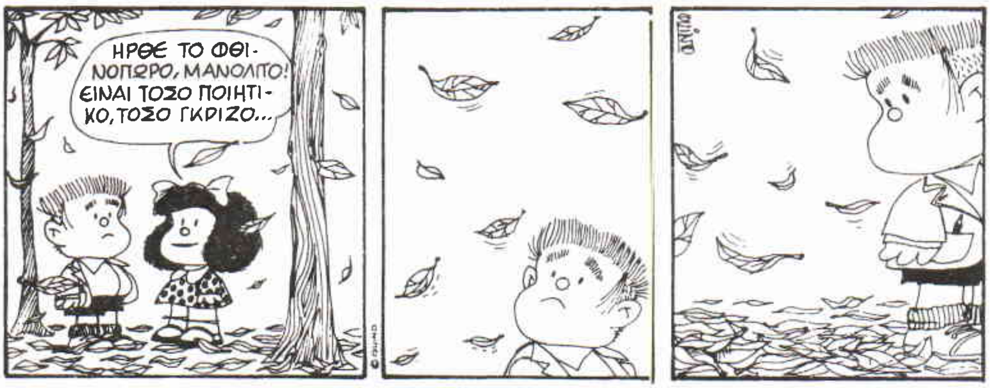


Η κίνηση

Ο κόσμος μας είναι ένας «κόσμος κίνησης». Οι μοτοσικλέτες τρέχουν, οι γλάροι παίρνουν τα καράβια από πίσω, οι άνθρωποι βιάζονται να προλάβουν, τα σύννεφα μετακινούνται, τα βερίκοκα μόλις ωριμάσουν πέφτουν προς τη γη και η Γη στο μεταξύ γυρίζει και πλανιέται ταυτόχρονα. Είναι ακόμα τα ηλεκτρόνια που κινούνται γύρω από τους πυρήνες κι ολόκληρα τα μοριακά συγκροτήματα, που βρίσκονται σε κίνηση αδιάκοπη. Θα μπορούσαμε να πούμε ότι η κίνηση είναι ο τρόπος ύπαρξης του κόσμου.

Η πολυπλοκότητα των κινήσεων

Θα ξεκινήσουμε μια προσπάθεια να περιγράψουμε την κίνηση. Θα μπορούσαμε ν' αρχίσουμε από την κίνηση που κάνει το πιστόνι του κινητήρα καθώς τρέχει μια μοτοσικλέτα, αλλά το φαινόμενο εξελίσσεται πολύ γρήγορα και μας φαίνεται και αρκετά σύνθετο.



Ας καταφύγουμε σε κάτι πιο απλό και πιο κοντά στους ρυθμούς της φύσης. Η κίνηση, για παράδειγμα, του φύλλου που πέφτει από το δέντρο το φθινόπωρο. Αν την παρακολουθήσουμε προσεκτικά, διαπιστώνουμε ότι, καθώς το φύλλο πλησιάζει προς τη γη, ταυτόχρονα περιστρέφεται και ταλαντεύεται. Το συμπέρασμα είναι ότι μια τόσο «φυσική» κίνηση είναι ένα φαινόμενο πιο πολύπλοκο και από την κίνηση του προηγούμενου μηχανισμού. Απ' την άλλη ακόμα κι αν επινοήσουμε έναν τρόπο να περιγράψουμε την κί-

νηση αυτή με ακρίβεια, δεν θα έχουμε πετύχει να περιγράψουμε την πτώση των φύλλων, γιατί είναι ζήτημα αν υπάρχουν δυο φύλλα που να πέφτουν με τον ίδιο τρόπο.

Βρισκόμαστε μπροστά σ' ένα δίλημμα. Θέλουμε να περιγράψουμε την κίνηση, αλλά όλα αυτά που παρατηρούμε είναι για μας πολύπλοκα.

Για να το ξεπεράσουμε θα χρειαστεί να κάνουμε δύο πράγματα: **να δημιουργήσουμε μια γλώσσα περιγραφής** και **να καταφύγουμε στο εργαστήριο**.

i) Η γλώσσα τη περιγραφής. Ο Γαλιλαίος μάς δίδαξε ότι η περιγραφή της κίνησης μπορεί να γίνει σε μία ορισμένη γλώσσα η οποία περιέχει έννοιες όπως ο χώρος, ο χρόνος, το σύστημα αναφοράς, η τροχιά και το σημειακό αντικείμενο. Η γλώσσα της περιγραφής περιέχει επίσης και στοιχεία των μαθηματικών.

ii) Στο εργαστήριο. Εφοδιασμένοι με τη γλώσσα της περιγραφής καταφεύγουμε στο εργαστήριο. Εκεί αναπαράγουμε τα γεγονότα που μας ενδιαφέρουν, διατυπώνουμε υποθέσεις, κάνουμε μετρήσεις με κατάλληλα όργανα και βγάζουμε συμπεράσματα τα οποία διατυπώνουμε στη γλώσσα των μαθηματικών. Η πειραματική εμπειρία συμβάλλει όμως και στον εμπλουτισμό των αρχικών εννοιών αλλά και στην οικοδόμηση καινούριων.

Η γλώσσα της περιγραφής

α. Η έννοια *τροχιά*

Μέσα στην τεράστια ποικιλία των κινήσεων υπάρχει ένα κοινό γνώρισμα. Για να το δούμε ας παρακολουθήσουμε μια πολύ αργή κίνηση. Ένα μυρμήγκι μετακινείται πάνω στη σκακιέρα μας. Καθώς περνάει ο χρόνος, αλλάζει τετράγωνο, αλλάζει δηλαδή θέση σε σχέση μ' ένα ορισμένο σύστημα αναφοράς. Κάτι ανάλογο συμβαίνει με το γλάρο, με τη μοτοσικλέτα ή με το σύννεφο.

Γενικά: *Κίνηση ενός αντικειμένου λέγεται η χρονική αλλαγή της θέσης του ως προς ένα σύστημα αναφοράς.*

Αν είχαμε φροντίσει να υπάρχει πάνω στη σκακιέρα ένα λεπτό στρώμα από αλεύρι, τα πόδια του μυρμηγκιού θα άφηναν σημάδια που θα φανέρωναν την τροχιά. Καθώς κινείται ένα αντικείμενο ως προς κάποιο σύστημα αναφοράς κάθε σημείο του «χαράσσει» στο χώρο μια νοητή γραμμή που λέγεται *τροχιά*.

Η κιμωλία αφήνει στον πίνακα το ίχνος της τροχιάς του, όπως οι γραμμένες λέξεις φανερώνουν την τροχιά της μύτης του μολυβιού. Η μορφή της τροχιάς είναι ένα από τα χαρακτηριστικά της κίνησης. Λέμε, για παράδειγμα, ευθύγραμμη κίνηση, όταν η τροχιά είναι ευθεία γραμμή. Όταν η τροχιά είναι κύκλος, η κίνηση λέγεται κυκλική.

Για να μπορεί βέβαια η τροχιά ενός αντικειμένου να θεωρηθεί σαν μια γραμμή, θα πρέπει το αντικείμενο να είναι κάτι σαν «σημείο γεωμετρικό». Σ' αυτήν την περίπτωση θα μιλάμε για *υλικό σημείο* ή για *σημειακό αντικείμενο.*

β. Οι εξισώσεις κίνησης

Ας ξαναγυρίσουμε στη σκακιέρα. Συνεχίζουμε να παρακολουθούμε το μυρμήγκι καθώς μετακινείται αργά. Μπορούμε να το θεωρήσουμε σημειακό αντικείμενο. Σημειώνουμε τη θέση του, εντοπίζουμε δηλαδή το τετράγωνο στο οποίο βρίσκεται, σε διάφορες χρονικές στιγμές. Φτιάχνουμε και έναν πίνακα των θέσεών του και των αντίστοιχων χρονικών στιγμών.

Αν αρκεστούμε μονο στις πληροφορίες που παίρνουμε από τα τετράγωνα στα οποία βρέθηκε σε διάφορες χρονικές στιγμές, η πε-

ριγραφή δεν θα είναι πλήρης. Μεγαλύτερη ακρίβεια θα πετυχαίναμε, αν είχαμε φροντίσει να σκεπάσουμε τη σκακιέρα με χαρτί μιλιμετρέ, οπότε θα παίρναμε πληροφορίες από τετράγωνα πολύ μικρότερα. Το καλύτερο απ' όλα, βέβαια, είναι να έχουμε ένα καρτεσιανό σύστημα αξόνων xOy και να παίρνουμε τις πληροφορίες για κάθε θέση από τις αντίστοιχες συντεταγμένες.

Στη γλώσσα των μαθηματικών η κίνηση ενός σημειακού αντικειμένου περιγράφεται με τις χρονικές συναρτήσεις των συντεταγμένων του. Οι συναρτήσεις αυτές λέγονται **εξισώσεις κίνησης.**

Στην περίπτωση μιας κίνησης στο επίπεδο οι εξισώσεις είναι δύο: $x=x(t)$ και $y=y(t)$. Για κίνηση σε μια διάσταση έχουμε μια εξίσωση, τη $x=x(t)$ η οποία μας δίνει τη θέση του αντικειμένου σε κάθε χρονική στιγμή.

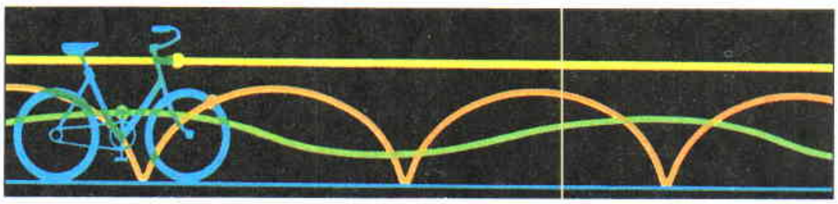
γ. Η έννοια *σύστημα αναφοράς*

Το καραβάκι έχει σαλπάρει από το λιμάνι του Πειραιά για την Αίγινα. Στην πρύμνη, ένας ευφάνταστος επιβάτης βλέπει τον Πειραιά να απομακρύνεται και σκέφτεται να φτιάξει εξισώσεις κίνησης. Στην αποβάθρα ένας λιμενεργάτης κοιτάζει προς τη μεριά της πόλης και φυσικά είναι σίγουρος ότι ο Πειραιάς μένει στη θέση του.



Κάτι ανάλογο συμβαίνει και με τους αλεξιπτωτιστές που επιχειρούν ένα ακροβατικό νούμερο στον αέρα. Έχουν πέσει από το αεροπλάνο και πρόκειται να σχηματίσουν ένα «αστέρι». Ένας από αυτούς, σε σχέση με το διπλανό του, είναι ακίνητος, ενώ ο ίδιος, αναφορικά με τη Γη, πέφτει.

Ας δούμε με ένα τρίτο παράδειγμα και το ζήτημα της



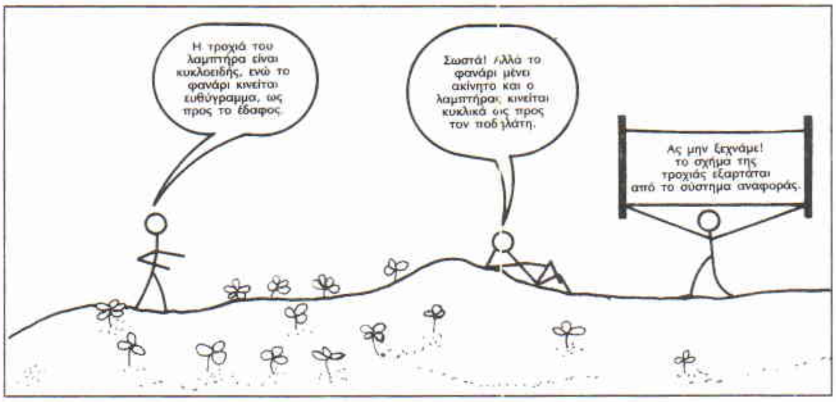
τροχιάς. Ένα πορτοκαλί λαμπάκι είναι στερεωμένο στη ζάντα ενός ποδήλατου.

Τι κίνηση κάνει το φανάρι που βρίσκεται στο πεντάλ;

Για τον ποδηλάτη η τροχιά του είναι κυκλική, ενώ για έναν παρατηρητή στο έδαφος η τροχιά του ίδιου αντικειμένου είναι μια κα-

μπύλη που λέγεται κυκλοειδής. Το φανάρι του ποδήλατου, τώρα για τον ποδηλάτη είναι ακίνητο. Για τον παρατηρητή όμως που βρίσκεται στο έδαφος το ίδιο φανάρι εμφανίζει τροχιά ευθύγραμμη.

Προτού φτάσουμε σε συνολικά συμπεράσματα, ας θυμηθούμε ότι οι συντεταγμένες ενός σημείου αλλάζουν κάθε φορά που αλλά-



ζουμε σύστημα αναφοράς.

Τα συμπεράσματα τώρα. **Η κίνηση ενός αντικειμένου περιγράφεται με διαφορετικές εξισώσεις και εμφανίζει διαφορετική τροχιά, εφόσον αλλάζουμε σύστημα αναφοράς.** Η κίνηση λοιπόν, δεν μπορεί να περιγραφεί παρά μόνο σε σχέση με ορισμένο σύστημα αναφοράς. Αυτό ακριβώς εννοούμε όταν λέμε ότι **η κίνηση είναι σχετική.** Ποιο είναι όμως, κάθε φορά, το κατάλληλο σύστημα αναφοράς, που θα πρέπει να επιλέγουμε, για να περιγράψουμε μια ορισμένη κίνηση; Παρ' όλο που με οποιοδήποτε σύστημα αναφοράς μπορούμε να κάνουμε την περιγραφή μιας κίνησης, μπορούμε να πούμε ότι το πιο κατάλληλο είναι εκείνο στο οποίο η κίνηση περιγράφεται πιο απλά.

δ. Η έννοια *διάνυσμα*

Μετατόπιση. Όλοι μας, σχεδόν, καθώς μιλάμε κουνάμε τα χέρια μας. Ας φανταστούμε την άκρη του αντίχειρα μιας καθηγήτριας, που προσπαθεί να επικοινωνήσει, από μακριά, με μια συνάδελφό της σε ώρα διαλείμματος. Καθώς το χέρι της μετακινείται από μια θέση σε μια άλλη, μπορούμε να εντοπίσουμε δύο σημεία του χώρου στα οποία βρέθηκε η άκρη του αντίχειρα. Το ένα ας το πούμε

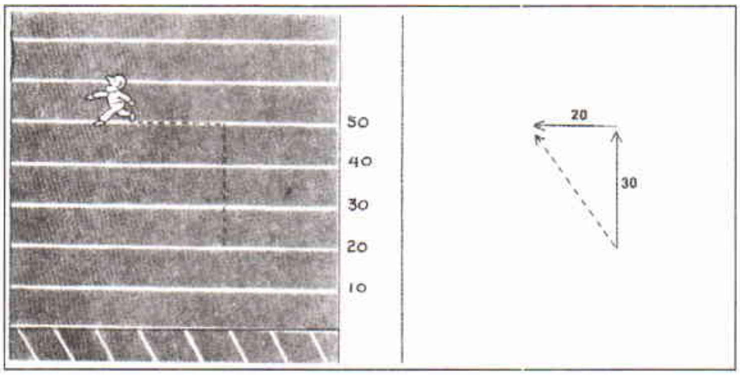
«Α» και το άλλο «Β». Ένας πολύ βολικός τρόπος για να παραστήσουμε αυτή την αλλαγή θέσης είναι να σχεδιάσουμε σ' ένα χαρτί ένα ευθύγραμμο τμήμα από το Α στο Β και ύστερα να απεικονίσουμε με την αιχμή ενός βέλους το γεγονός ότι η άκρη του αντίχειρα *ήταν* στο Α και *βρέθηκε* στο Β.

Το βέλος που δημιουργήσαμε έχει ορισμένο μήκος και συγκεκριμένη κατεύθυνση. Κάθε τέτοιο βέλος λέγεται μετατόπιση. Η μετατόπιση αναφέρεται σε σημειακό αντικείμενο το οποίο αλλάζει θέση και χαρακτηρίζεται α) από το μέτρο της που είναι ίσο με την απόσταση των δύο θέσεων και β) από την κατεύθυνσή της.

Ο κανόνας των μετατοπίσεων. Μεγέθη διανυσματικά. Αν η καθηγήτρια εξακολουθεί να μιλάει, κουνώντας τα χέρια της, μπορούμε να παραστήσουμε μια επόμενη μετατόπιση από το Β σε ένα άλλο σημείο Γ. Εύκολα διαπιστώνουμε ότι το τελικό αποτέλεσμα των δύο μετατοπίσεων θα είναι το ίδιο με τη μετατόπιση από το Α στο Γ. Τη μετατόπιση ΑΓ ονομάζουμε άθροισμα των δύο άλλων μετατοπίσεων και γράφουμε:

$$\overrightarrow{ΑΓ} = \overrightarrow{ΑΒ} + \overrightarrow{ΒΓ}$$

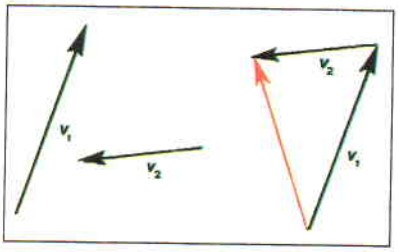
Κάθε έννοια που συμπεριφέρεται όπως η μετατόπιση λέγεται διάνυσμα. Μ' άλλα λόγια **τα διανύσματα είναι έννοιες οι οποίες α) έχουν μέτρο και κατεύθυνση και β) προστίθενται σύμφωνα με τον κανόνα των μετατοπίσεων.**



Η θέση, η ταχύτητα, η επιτάχυνση, η ορμή, η δύναμη είναι μεγέθη που παριστάνονται με διανύσματα και λέγονται **διανυσματικά**. Από την άλλη, μεγέθη όπως η μάζα, η χρονική διάρκεια, το έργο, η πυκνότητα, στα οποία το μέτρο τους και μόνο είναι στοιχείο αρκετό για να τα προσδιορίσει, λέγονται **μονόμετρα** ή βαθμωτά.

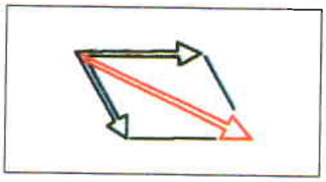
Βασιζόμενοι, λοιπόν, στον κανόνα των μετατοπίσεων μπορούμε

να προσθέσουμε δύο διανύσματα ως εξής:



Μεταφέρουμε παράλληλα το ένα από αυτά ώστε η αρχή του να συμπίπτει με το πέρας του άλλου. Το άθροισμα τους θα αντιστοιχεί στην πλευρά με την οποία «κλείνει» το τρίγωνο και θα κατευθύνεται από την αρχή του πρώτου προς το πέρας το δεύτερου.

Ο κανόνας του παραλληλογράμμου. Ένας άλλος τρόπος είναι ο λεγόμενος κανόνας του παραλληλογράμμου. Μεταφέρουμε παράλληλα το ένα από αυτά ώστε οι δύο αρχές να συμπέσουν και σχεδιάζουμε το παραλληλόγραμμο οι δύο πλευρές του οποίου αντιστοιχούν στα δύο διανύσματα. Το άθροισμα θα αντιστοιχεί στη διαγώνιο του παραλληλογράμμου και θα κατευθύνεται προς την τέταρτη κορυφή.



Εξυπακούεται ότι ο κανόνας του παραλληλογράμμου δεν μπορεί να εφαρμοστεί αν τα δύο διανύσματα έχουν ίδιες ή αντίθετες κατευθύνσεις.•

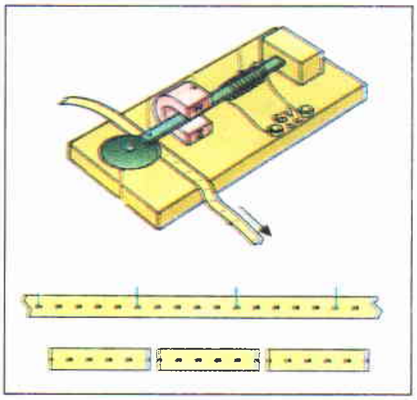
Βασιζόμενοι τέλος στους κανόνες αυτούς μπορούμε να αναλύσουμε ένα διάνυσμα σε δύο συνιστώσες.

* Η λέξη *κατεύθυνση* μπορεί να αντικαθιστά τις δύο λέξεις που επίσης χρησιμοποιούνται, τη *διεύθυνση* και *τη φορά*.

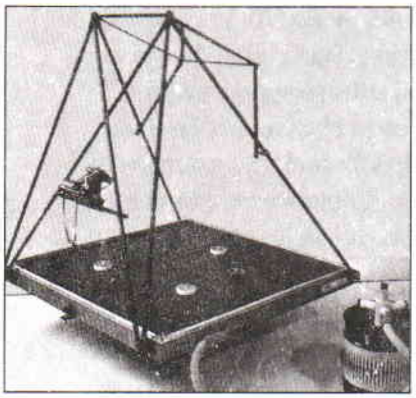
Στο εργαστήριο

Για να περιγράψουμε την κίνηση χρειαζόμαστε όργανα για άμεσες μετρήσεις χρόνων και αποστάσεων ή κάτι που θα μπορούσε να τα αντικαταστήσει. Κι αυτό γιατί στις γρήγορες κινήσεις δεν προφταίνουμε να σημειώνουμε τις θέσεις και τις χρονικές στιγμές. Υπάρχουν όμως πειραματικές τεχνικές με τις οποίες το πετυχαίνουμε.

Η χρονοφωτογραφία για παράδειγμα είναι μια καλή τεχνική. Το κινητό φωτίζεται σε κανονικά χρονικά διαστήματα και φωτογραφίζεται. Η φωτογραφία δίνει την εικόνα της κίνησης. Πάνω σ' αυτήν μπορούμε να προσδιορίσουμε θέσεις και χρονικές στιγμές.



Ο ηλεκτρικός χρονομετρητής με χαρτοταινία, που συνήθως υπάρχει στο σχολικό εργαστήριο, είναι ένα εύχρηστο εργαλείο για την ιχνηλασία μιας ευθύγραμμης κίνησης ανά ίσους χρόνους, καθένας από τους οποίους μπορεί να είναι ένα μικρό κλάσμα του δευτερολέπτου. Ένας στρεφόμενος τροχός (ή μια παλλόμενη ακίδα) αφήνει, με τη βοήθεια του καρμπόν, ίχνη πάνω στη –συνδεδεμένη με το κινούμενο αντικείμενο-χαρτοταινία. Η εικόνα που παίρνουμε μας δίνει το σύνολο των ιχνών, σοβαρές, δηλαδή, πληροφορίες για το ιστορικό της κίνησης.



Η αεροτράπεζα είναι ένα κιβώτιο (κάσα) του οποίου η πάνω επιφάνεια είναι τελείως επίπεδη και έχει ένα πυκνό δίκτυο από μικρές τρύπες μοιρασμένες κανονικά. Το κιβώτιο τροφοδοτείται με συμπιεσμένο αέρα. Ο αέρας που βγαίνει από τις μικρές τρύπες, παρεμβάλλεται ανάμεσα στην επιφάνεια του κιβώτιου και στην επιφάνεια ενός δίσκου που βρίσκεται πάνω στο κιβώτιο οπότε δημιουργείται ένα είδος «αερομαξιλαριού». Αν σπρώξουμε τον δίσκο, αυτός θα κινηθεί πάνω στην επιφάνεια με ουσιαστικά εκμηδενισμένες τις τριβές.

Τα αυτοστηριζόμενα κινητά είναι κυλινδρικά συνήθως σώματα που βγάζουν αέρα από την κάτω επιφάνειά τους και δημιουργούν το δικό τους αερομαξιλάρι. Έτσι χωρίς να έχουν ανάγκη τις τρύπες και τον αέρα της αεροτράπεζας μπορούν να μετατοπίζονται πάνω σε επίπεδη επιφάνεια ουσιαστικά χωρίς τριβές.

Κίνηση σε μία διάσταση

Γενικά

Η θέση και η μετατόπιση. Για να περιγράψουμε την ευθύγραμμη κίνηση ενός αντικειμένου, το πιο βολικό είναι να χρησιμοποιήσουμε έναν άξονα (x'Ox) που να συμπίπτει με την τροχιά. Ας υποθέσουμε ότι το κινούμενο αντικείμενο κατά τη χρονική στιγμή t_1 βρίσκεται στο M_1. Το διάνυσμα OM_1 παριστάνει το φυσικό μέγεθος **θέση** του αντικειμένου και συμβολίζεται με x_1. Η τιμή του διανυσματικού αυτού μεγέθους είναι θετική εφόσον η κατεύθυνση του διανύσματος συμπίπτει με τη θετική κατεύθυνση του άξονα και στην αντίθετη περίπτωση αρνητική.



Υποθέτουμε ότι στη συνέχεια –κατά τη χρονική στιγμή t_2– το κινητό βρίσκεται στο σημείο M_2. Η νέα θέση ($\vec{x_2}$) παριστάνεται με το διάνυσμα $\vec{OM_2}$ ενώ το διάνυσμα $\vec{M_1M_2}$ εκφράζει τη *μετατόπιση* του αντικειμένου κατά τη χρονική διάρκεια από t_1 μέχρι t_2. Από το σχήμα είναι φανερό ότι $\vec{x_1}+\vec{M_1M_2}=\vec{x_2}$ ή $\vec{M_1M_2}=\vec{x_2}-\vec{x_1}$

Μετατόπιση είναι λοιπόν η μεταβολή της θέσης. Στις ευθύγραμμες κινήσεις, μπορούμε να τη συμβολίζουμε με Δx. Αν με x_2 και x_1 συμβολίσουμε τις αντίστοιχες αλγεβρικές τιμές θα έχουμε $\Delta x,=x_2-x_1$

Συνοψίζουμε. Κατά την περιγραφή μιας ευθύγραμμης κίνησης.

α) η έννοια *θέση* αναφέρεται σε σημειακό αντικείμενο, σε άξονα και σε συγκεκριμένη χρονική στιγμή. Η (αλγεβρική) τιμή της συμπίπτει με τη συντεταγμένη του σημείου στο οποίο βρίσκεται το αντικείμενο και εφόσον είναι θετική σημαίνει ότι το αντικείμενο βρίσκεται στον θετικό ημιάξονα.

β) Η έννοια *μετατόπιση* (μεταβολή θέσης) αναφέρεται σε κινούμενο σημειακό αντικείμενο σε άξονα και σε συγκεκριμένη χρονική διάρκεια. Αν η τιμή της είναι θετική σημαίνει ότι το αντικείμενο μετακινήθηκε προς τη θετική κατεύθυνση του άξονα.

Κατά την περιγραφή της ευθύγραμμης κίνησης ο βασικός μας στόχος είναι να καταστρώσουμε την εξίσωση θέσης – χρόνου x=x(t). Η επιδίωξή μας αυτή προϋποθέτει τη γνωριμία με ορισμένα

μεγέθη, όπως η ταχύτητα και η επιτάχυνση.

Πόσο γρήγορα κινείται; Προς τα που κατευθύνεται; Για να απαντήσουμε στο ερώτημα «*πόσο γρήγορα*» τρέχει ένας μοτοσικλετιστής χρειάζεται να γνωρίζουμε το «*πόσα χιλιόμετρα την ωρα*», να μάθουμε δηλαδή «*πόση είναι η ταχύτητά του*». Το ίδιο θα κάναμε και για ένα χελιδόνι ή και για μια κολυμβήτρια. Θα αναζητούσαμε την ταχύτητά τους. Στη γλώσσα της καθημερινής μας ζωής η ταχύτητα είναι μια ποσότητα που δίνει απάντηση στο ερώτημα «*πόσο γρήγορα κινείται ένα αντικείμενο;*» και μόνο σ' αυτό.

Στη γλώσσα, όμως, της φυσικής η ίδια λέξη χρησιμοποιείται με νόημα κάπως διαφορετικό. Η ταχύτητα της φυσικής απαντά όχι μόνο στο ερώτημα «πόσο γρήγορα κινείται ένα αντικείμενο;» αλλά και στο ερώτημα «*προς τα που κατευθύνεται;*»

α) Το «πόσο γρήγορα». Ένα μηχανάκι «παπί» σε μια λωρίδα της οδού Πατησίων διανύει 110 μέτρα σε 10 δευτερόλεπτα. Κινείται άραγε πιο γρήγορα από ένα τρόλεϊ το οποίο σε μια άλλη λωρίδα διανύει 144 μέτρα σε 16 δευτερόλεπτα; Σκεφτόμαστε ότι για να κάνουμε τη σύγκριση θα χρειαστεί να υπολογίσουμε το *πόσα μέτρα μετακινείται το καθένα σε κάθε δευτερόλεπτο,* να διαιρέσουμε δηλαδή τη μετατόπιση του καθενός με την αντίστοιχη χρονική διάρκεια:

Αυτό που μας δίνει η διαίρεση, το πηλίκο δηλαδή του μέτρου της μετατόπισης προς τον αντίστοιχο χρόνο λέγεται μέτρο της **μέσης ταχύτητας** του αντικειμένου.

Μονάδα μέτρησης της μέσης ταχύτητας θα είναι συνεπώς το πηλίκο της μιας μονάδας μήκους προς τη μία μονάδα χρονικής διάρκειας. Το ένα πόδι ανά πρώτο λεπτό, η μία γυάρδα ανά δευτερόλεπτο, είναι μονάδες που θα μπορούσαμε να χρησιμοποιήσουμε. Στη φυσική, στο Διεθνές Σύστημα μονάδων, η μονάδα μέτρησης της μέσης ταχύτητας είναι το ένα μέτρο ανά δευτερόλεπτο. Συμβολίζεται με 1 m/s.

β) Το προς τα πού. Εφόσον η μετατόπιση (μεταβολή θέσης) είναι μέγεθος διανυσματικό, το πηλίκο της μετατόπισης προς το χρόνο, αποτελεί μέγεθος διανυσματικό. Η κατεύθυνσή του περιγράφει το *προς τα πού έγινε η μετατόπιση.*

Μέση ταχύτητα. Θεωρούμε ένα σημειακό αντικείμενο σε ευθύγραμμη τροχιά. Χρησιμοποιούμε ως σύστημα αναφοράς έναν άξονα x'Ox που να συμπίπτει με την τροχιά. Θεωρούμε και μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή ως αρχή των χρόνων. Υποθέτουμε ότι τη

χρονική στιγμή t_1 η θέση του κινητού ήταν x_1 και τη χρονική στιγμή t_2 ήταν x_2.

Ορίζουμε ως μέση ταχύτητα ένα διανυσματικό μέγεθος με **μέτρο** το πηλίκο της μετατόπισης προς τον χρόνο και με **κατεύθυνση** την κατεύθυνση της μετατόπισης.

Τόσο το μέτρο όσο και η κατεύθυνση του διανυσματικού αυτού μεγέθους μπορούν να περιγραφούν με την αλγεβρική τιμή του –η οποία αναφέρεται στον συγκεκριμένο άξονα– και είναι:

$$\upsilon_\mu = \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1}$$

Το σύμβολο υ είναι το καλλιγραφικό αρχικό της λέξης velocity που σημαίνει ταχύτητα.

Η απόλυτη τιμή του παραπάνω πηλίκου αποτελεί το μέτρο της μέσης ταχύτητας ενώ το πρόσημό της μας πληροφορεί για την κατεύθυνσή της.

Αν υποθέσουμε ότι t_1=0 s, t_2=3 s, x_1=+26 cm και x_2=47 cm, θα είναι x_2-x_1=+21cm, t_2 -t_1=+7s, οπότε υ_μ=8 cm/s. Το θετικό πρόσημο σημαίνει ότι η κατεύθυνση της μέσης ταχύτητας είναι προς τη θετική φορά του άξονα.

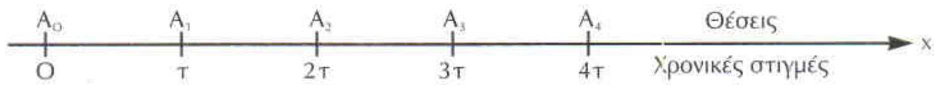
Η εξίσωση ορισμού της μέσης ταχύτητας γράφεται και με τη μορφή $\boldsymbol{\upsilon_\mu = \Delta x / \Delta t}$.

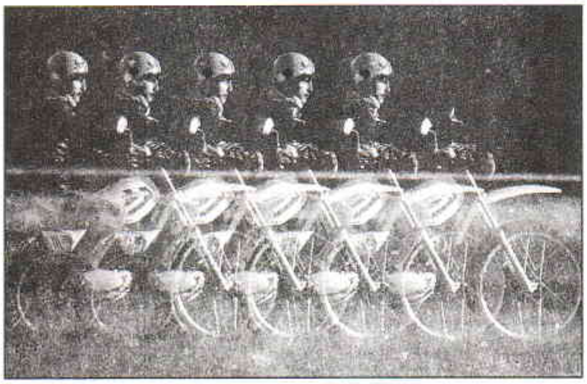
Ευθύγραμμη ομαλή κίνηση

Τα γεγονότα. Ένας μοτοσικλετιστής φωτίζεται ανά ίσα χρονικά διαστήματα και φωτογραφίζεται. Πάνω στη φωτογραφία μπορούμε να εντοπίσουμε τα σημεία του χώρου στα οποία βρέθηκε η άκρη της μύτης του σε χρονικές στιγμές που απέχουν 1/40 του δευτερολέπτου.

Οι μετρήσεις Θεωρούμε ότι η άκρη της μύτης του μοτοσικλετιστή είναι σημειακό αντικείμενο. Διαπιστώνουμε ότι η τροχιά του είναι μία ευθεία γραμμή και ότι οι μετατοπίσεις A_0A_1, A_1A_2, A_2A_3 , A_3A_4, –που αντιστοιχούν στα ίσα χρονικά διαστήματα 1/40 s – είναι όλες ίσες με 64 cm.

Αν υπολογίσουμε τις τιμές της μέσης ταχύτητας σε *διαφορετικά χρονικά διαστήματα,* όπως (0,τ) (2τ,4τ)(3τ,4τ), θα προκύψει ότι σε καθένα από αυτά η μέση ταχύτητα έχει τιμή +25,6 m/s, έχει δηλαδή το ίδιο μέτρο και την ίδια κατεύθυνση.





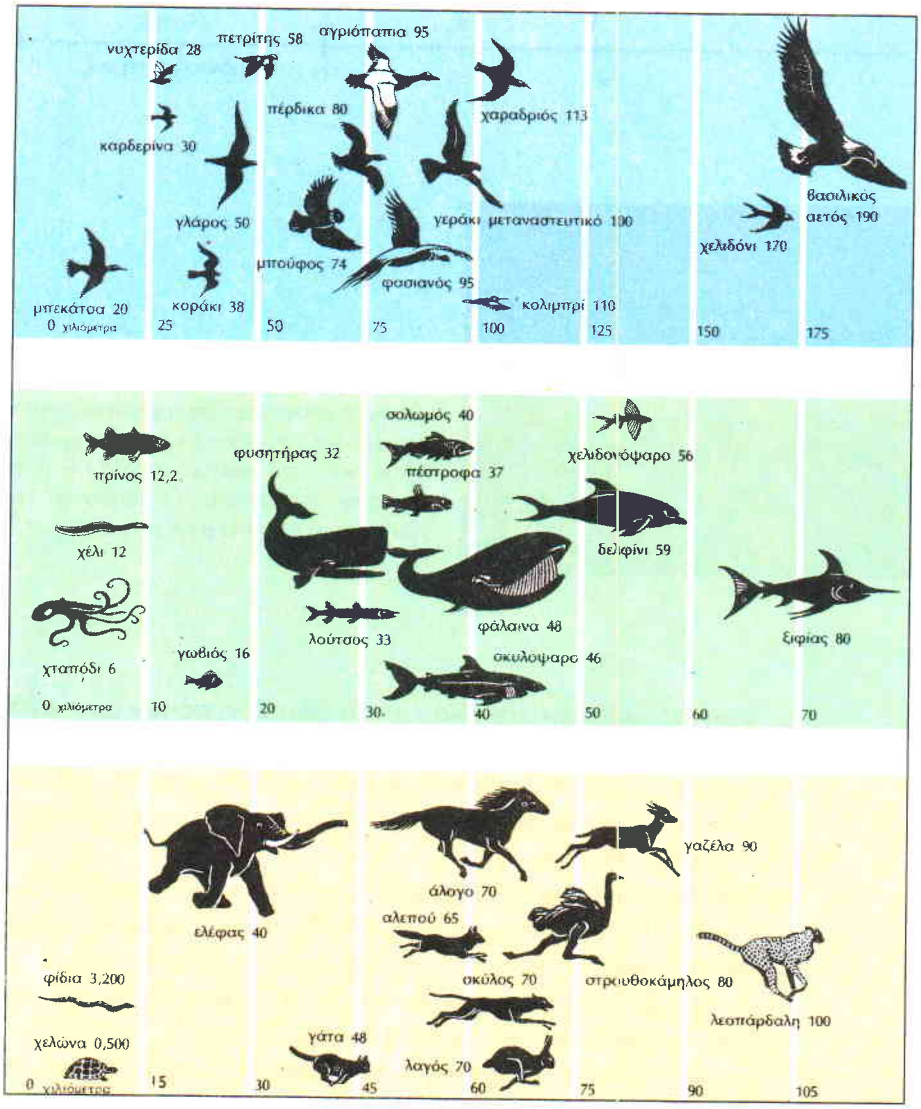
Η κίνηση του άκρου της μύτης του μοτοσικλετιστή αναπαριστάνεται πάνω στον προσανατολισμένο άξονα x με το σημείο A_0 να αντιστοιχεί στη χρονική στιγμή t = 0 (αρχή μέτρησης του χρόνου). Οι διαδοχικές θέσεις του κινητού αντιστοιχούν στα σημεία A_0, A_1, A_2, A_3, A_4.

Φωτογραφίζουμε την ίδια κίνηση φωτίζοντας τον μοτοσικλετιστή σε ίσα χρονικά διαστήματα αλλά μικρότερης διάρκειας από την προηγούμενη. Επαναλαμβάνουμε την ίδια διαδικασία και διαπιστώνουμε ότι το πηλίκο Δx/Δt έχει την ίδια τιμή +25,6 m/s για οποιαδήποτε χρονικά διαστήματα.

Η θεωρητική σκέψη Εντοπίζουμε την προσοχή μας στο ότι η τιμή του πηλίκου Δx/Δt διατηρείται αμετάβλητη για οσονδήποτε μεγάλα ή μικρά χρονικά διαστήματα. Αυτή η ιδιότητα μας επιτρέπει:
α) να *προβλέπουμε* την απόσταση που διανύει το κινητό σε μια χρονική διάρκεια αν είναι γνωστή σε μια άλλη και
β) να ισχυριστούμε ότι υπάρχει *μόνο μία ταχύτητα* η τιμή της οποίας συμπίπτει με την ένδειξη του ταχυμέτρου της μοτοσικλέτας.
Μπορούμε, επομένως, να θεωρήσουμε ότι το πηλίκο Δx / Δt μας δίνει την τιμή της **ταχύτητας.**

Ο ορισμός Κάθε κίνηση με σταθερή ταχύτητα λέγεται **ευθύγραμμη ομαλή κίνηση.** Το «ευθύγραμμη» χαρακτηρίζει, φυσικά, το είδος της τροχιάς της και το «ομαλή» τη σταθερότητα του μέτρου της ταχύτητας.

Η εξίσωση κίνησης Ας θεωρήσουμε το αντικείμενο να κινείται ευθύγραμμα και ομαλά σε άξονα που συμπίπτει με την τροχιά του και ας υποθέσουμε ότι κατά τις χρονικές στιγμές t_0 και t οι θέσεις του



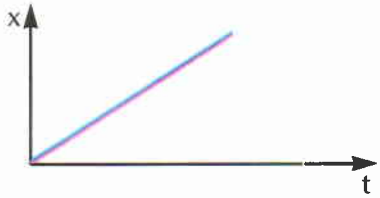
Ας χρονομετρήσουμε έναν «κατοστάρη» πρωταθλητή στίβου. Από την πιστολιά μέχρι το νήμα 10,1 δευτερόλεπτα που σημαίνει 35,6 χιλιόμετρα την ώρα. Αν βέβαια συγκριθεί με την ταχύτητα του ελέφαντα «πρωταθλητή», που είναι γύρω στα 40 km/h ή της γάτας πρωταθλήτριας, που φτάνει τα 48 km/h, θα δείξει ότι ο άνθρωπος δεν είναι από τα ιδιαίτερα γρήγορα ζώα.



να είναι αντίστοιχα x_0, x. Τότε η ταχύτητα του αντικειμένου θα είναι $\upsilon=x-x_0/t-t_0$.
Αν θεωρήσουμε $t_0=0$ και $x_0=0$, η προηγούμενη σχέση παίρνει τη μορφή:

$$\mathbf{x=\upsilon t}$$

και είναι η εξίσωση που μας δίνει τη **θέση του κινητού σε κάθε μελλοντική στιγμή.**
Η γραφική παράσταση Αν «δούμε» τη σχέση $x=\upsilon t$ ως συνάρτηση με μεταβλητές τη θέση x και τη χρονική στιγμή t, μπορούμε να την παραστήσουμε γραφικά σε άξονες x και t.



Για κάθε ευθύγραμμη ομαλή κίνηση το διάγραμμα (x, t) θα είναι ευθεία γραμμή εφόσον η σχέση είναι πρωτοβάθμια.

Η ταχύτητα

Τα γεγονότα Αν επιδιώξουμε να πραγματοποιήσουμε μια ευθύγραμμη ομαλή κίνηση στο εργαστήριο θα διαπιστώσουμε ότι μόνο κατά προσέγγιση μπορούμε να το πετύχουμε. Παρόλα αυτά οι ιδιότητες αυτής της κίνησης θα αποτελέσουν το πρότυπο στο οποίο θα βασιστούμε για να περιγράψουμε και κινήσεις που δεν είναι ομαλές.

Στο εργαστήριο καταγράψαμε την κίνηση ενός σημειακού αντικειμένου. Το «ιστορικό» της αναπαριστάνεται στη χαρτοταινία.

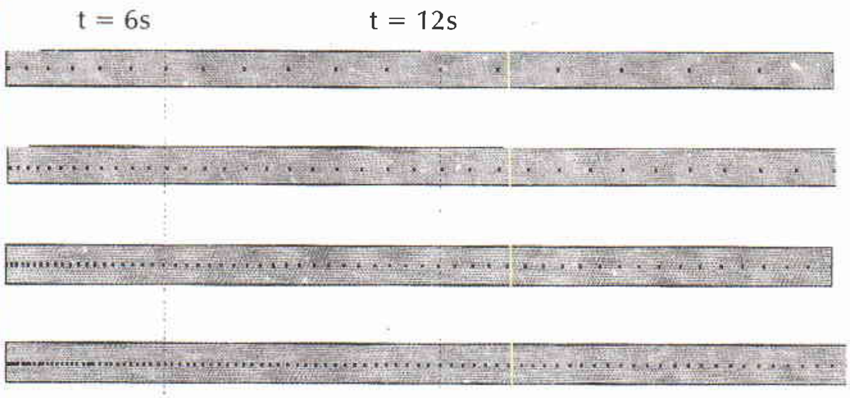


Οι μετρήσεις. Είναι φανερό ότι η κίνηση αυτή δεν μπορεί να χαρακτηριστεί ως ομαλή. Αν μετρήσουμε την απόσταση που διανύει το αντικείμενο σε ένα χρονικό διάστημα δεν μπορούμε να προβλέψουμε την απόσταση που θα διανύσει σε ένα άλλο χρονικό διάστημα. Η σχέση αναλογίας θέσης-χρόνου που γνωρίσαμε στην ομαλή κίνη-

ση δεν μπορεί να εφαρμοσθεί σ' αυτήν την περίπτωση. Επιπλέον, θα μπορούσαμε να πούμε ότι δεν υπάρχει *μία* ταχύτητα.

Το αντικείμενο έχει «πολλές ταχύτητες» που κυμαίνονται από πολύ μικρές στην αρχή της κίνησης μέχρι πιο μεγάλες στο τέλος της.

Το αδιέξοδο μπορεί να ξεπεραστεί αν πραγματοποιήσουμε την **ίδια ακριβώς κίνηση** αλλά με μικρότερο χρόνο αποτύπωσης των διαδοχικών στιγμάτων στη χαρτοταινία. Τα ιστορικά της ίδιας κίνησης αναπαριστάνονται στα παρακάτω σχήματα.



Η θεωρητική σκέψη Χωρίς μαθηματικά και χωρίς ακριβείς μετρήσεις καταλήγουμε σε ένα συμπέρασμα-κλειδί για την περιγραφή μιας οποιαδήποτε κίνησης:

Σε κάθε χρονικό διάστημα που μπορεί να θεωρηθεί μικρό (σε σχέση με την ανθρώπινη αντίληψη) η κίνηση μπορεί να θεωρηθεί ομαλή.

Αυτό σημαίνει ότι όσα μάθαμε για την ταχύτητα στην ευθύγραμμη ομαλή κίνηση, μπορούμε να τα χρησιμοποιήσουμε σε μια οποιαδήποτε κίνηση αρκεί να περιοριστούμε σε μικρά χρονικά διαστήματα.

Αν υπολογίσουμε τη *μέση ταχύτητα* από τη στιγμή t = 6s μέχρι τη στιγμή της επόμενης καταγραφής – για κάθε μία από τις διαφορετικές αναπαραστάσεις-διαπιστώνουμε ότι το πηλίκο της μετατόπισης προς τον αντίστοιχο χρόνο πλησιάζει προς μία τιμή. Με άλλα λόγια, μπορεί να μικραίνει τόσο η μετατόπιση όσο και το αντίστοιχο χρονικό διάστημα αλλά το πηλίκο τους προσεγγίζει μία τιμή. Σε όσο μικρότερο χρόνο γίνονται οι μετρήσεις τόσο πλησιάζουμε στην τιμή της «στιγμαίας ταχύτητας». Εφόσον δεχόμαστε ότι

στο χρονικό διάστημα από t = 6s μέχρι την «επόμενη» χρονική στιγμή η κίνηση είναι ομαλή, είναι λογικό να δεχτούμε ότι έχει νόημα να μιλάμε για στιγμιαία ταχύτητα ή για ταχύτητα σε μια στιγμή (t = 6s) δηλαδή για ρυθμό μεταβολής της θέσης σε μια χρονική στιγμή.

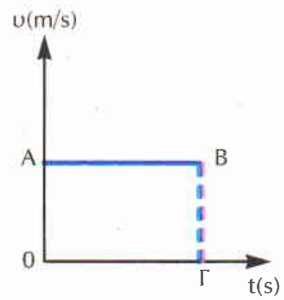
Ο ορισμός Η ταχύτητα ενός σημειακού αντικειμένου μια ορισμένη χρονική στιγμή της κίνησης ορίζεται ως ο **ρυθμός μεταβολής της θέσης κατά τη στιγμή εκείνη.** Υπολογίζεται από την τιμή στην οποία τείνει η μέση ταχύτητα όταν η χρονική διάρκεια μέτρησης τείνει στο μηδέν.

Όπως και η μέση ταχύτητα είναι μέγεθος διανυσματικό. Έχει δύο στοιχεία:

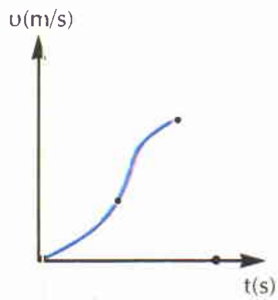
(α) το *μέτρο* που μας πληροφορεί για το «πόσο γρήγορα» κινείται το αντικείμενο εκείνη ακριβώς τη στιγμή και

β) την *κατεύθυνση* που μας πληροφορεί για το «προς τα πού» πηγαίνει το αντικείμενο κατά τη στιγμή εκείνη. Και τα δύο στοιχεία είναι απαραίτητα, για να λέμε ότι η ταχύτητα είναι γνωστή. Αν οποιοδήποτε από αυτά τα δύο μεταβληθεί, λέμε ότι η ταχύτητα άλλαξε.

Σε κάθε χρονική στιγμή υπάρχει μία ταχύτητα



Ευθύγραμμη κίνηση
με σταθερή ταχύτητα



Ευθύγραμμη κίνηση
με μεταβαλλόμενη ταχύτητα

Στο πρώτο διάγραμμα εύκολα αποδεικνύεται ότι το εμβαδόν του παραλληλογράμμου ΑΒΓΟ είναι ίσο με την τιμή της μετατόπισης. Αντίστοιχη διαπίστωση μπορεί να γίνει και για το εμβαδόν στο δεύτερο διάγραμμα αλλά η απόδειξη δεν είναι εύκολη.

Η ταχύτητα στην πράξη Η ταχύτητα ενός σημειακού αντικειμένου υπολογίζεται –κατά προσέγγιση– αν διαθέτουμε τη *χρονοφωτογραφία της κίνησης*. Θα χρειαστούμε και ένα υποδεκάμετρο. Εντοπίζουμε τη προσοχή μας στο σημείο που μας ενδιαφέρει και στο αμέσως επόμενο και διαιρούμε τη μεταξύ τους απόσταση με την αντίστοιχη χρονική διάρκεια.

Με τον ίδιο τρόπο υπολογίζεται η στιγμιαία ταχύτητα αν διαθέτουμε το ιστορικό μιας κίνησης με τα ίχνη της σε χαρτοταινία.

Καλύτερη προσέγγιση της ταχύτητας τη χρονική στιγμή t θα έχουμε αν μετρήσουμε την απόσταση δύο σημείων που αντιστοιχούν στις χρονικές στιγμές t-τ και t+τ και τη διαιρέσουμε με τη χρονική διάρκεια 2τ.

Ήδη από την εποχή τού Γαλιλαίου το ζήτημα της στιγμιαίας ταχύτητας ήταν ένα από τα πρώτα δύσκολα προβλήματα της νεαρής τότε Κινηματικής. Ήταν σε χρήση μόνο η λογική της μέσης ταχύτητας που δίνει, όπως ξέρουμε, το ρυθμό μετακίνησης σε μια χρονική διάρκεια. Το πρόβλημα ήταν το «πως» θα μπορούσε να δημιουργηθεί ένα μέγεθος ικανό να *περιγράφει το ρυθμό μετακίνησης σε μια χρονική στιγμή*. Μια λύση δόθηκε μόνο κατά τα τέλη τού 17ου αιώνα – από τον Νεύτωνα και το Leibnitz, ανεξάρτητα – με την επινόηση μιας εντελώς κανούριας μαθηματικής έννοιας που τη λέμε παράγωγο.

Η επιτάχυνση στην ευθύγραμμη κίνηση

Στις μέρες μας, η λέξη *επιτάχυνση* φέρνει στο μυαλό κυρίως μοτοσικλέτες και αυτοκίνητα. Πολλοί, διαβάζοντας στα σχετικά περιοδικά ότι η τάδε μηχανή «πιάνει τα 100» σε έξι δευτερόλεπτα, κυριεύονται από θαυμασμό. Στην κοινή γνώμη ευρύτερα η επιτάχυνση σχετίζεται αφηρημένα με την αύξηση της ταχύτητας. Στη φυσική, η ιδέα της επιτάχυνσης πρωτοεμφανίστηκε με τον Γαλιλαίο τον 17ο αιώνα στην προσπάθειά του να επινοήσει ένα μέγεθος κατάλληλο να εκφράζει τις αλλαγές της κινητικής κατάστασης ενός αντικειμένου.

Τα γεγονότα. Με ένα στροβοσκόπιο μπορούμε να φωτίζουμε σε ίσα χρονικά διαστήματα 0,1 του δευτερολέπτου μια μικρή σφαίρα

καθώς κυλάει σε κεκλιμένο επίπεδο. Με ανοιχτό το διάφραγμα μιας φωτογραφικής μηχανής αποτυπώνουμε την κίνηση της σφαίρας στην παρακάτω χρονοφωτογραφία. Το ιστορικό της κίνησης δείχνει καθαρά ότι η κίνηση είναι ευθύγραμμη αλλά δεν είναι ομαλή. Σε κάθε χρονική στιγμή η σφαίρα έχει διαφορετική ταχύτητα.



Ας μετρήσουμε την ταχύτητα της σφαίρας σε δύο διαφορετικές στιγμές t_1 και t_2 οι οποίες απέχουν χρονικά κατά 0,8 s. Θεωρούμε ότι η τροχιά συμπίπτει με άξονα τον οποίο προσανατολίζουμε με φορά προς το κάτω μέρος του κεκλιμένου επιπέδου. Εφαρμόζουμε τη γνωστή τεχνική.

Η τιμή της ταχύτητας κατά τη στιγμή t_1 είναι 0,039 m/0.10s = 0,39 m/s. Γράφουμε υ_1 = 0,39 m/s.

Η τιμή της ταχύτητας κατά τη στιγμή t_2 είναι 0,104 m/0.10s = 1,04 m/s. Γράφουμε υ_2 = 1,04 m/s.

Είναι φανερό ότι κατά τη χρονική διάρκεια 0,8 s παρατηρήθηκε μεταβολή της ταχύτητας της σφαίρας κατά 1,04 m/s -0,39 m/s = 0.65 m/s. Γράφουμε $\Delta\upsilon$ = 0,65 m/s

Αν θέλουμε να δημιουργήσουμε ένα μέγεθος που να εκφράζει το «πόσο γρήγορα έγινε, κατά μέσο όρο, η αλλαγή» θα χρειαστεί να διαιρέσουμε τη μεταβολή της ταχύτητας με τη χρονική διάρκεια Δt στην οποία παρατηρήθηκε.

$$\frac{\Delta\upsilon}{\Delta t} = \frac{0,65\ m/s}{0.8s} = 0.81\ m/s^2$$

Το πηλίκο αυτό λέγεται **μέση επιτάχυνση.** Είναι μέγεθος διανυσματικό. Εφόσον η κίνηση είναι ευθύγραμμη μπορούμε να γράφουμε για την αλγεβρική τιμή της

$$\alpha_\mu = \frac{\Delta\upsilon}{\Delta t}$$

Μονάδα μετρήσεως στο Διεθνές Σύστημα μονάδων θα είναι η μονάδα ταχύτητας (1m/s) προς τη μονάδα χρόνου (1s), δηλαδή (1m/s) / 1s και μπορούμε βέβαια να γράφουμε 1 m/s^2.

Ο ορισμός. Για να οικοδομήσουμε, τέλος, την έννοια επιτάχυνση χρησιμοποιούμε την ίδια λογική πάνω στην οποία θεμελιώθηκε η έννοια ταχύτητα.

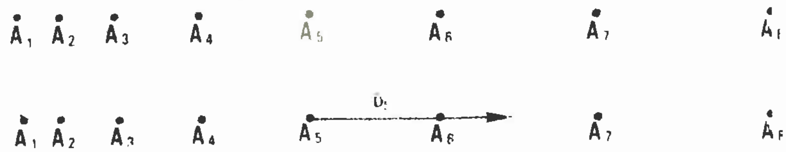
Η επιτάχυνση ενός αντικειμένου σε μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή της κίνησης ορίζεται ως **ο ρυθμός μεταβολής της ταχύτητας κατά τη στιγμή εκείνη**. Υπολογίζεται από την τιμή στην οποία τείνει η μέση επιτάχυνση όταν η χρονική διάρκεια της μεταβολής τείνει στο μηδέν. Συμβολίζεται με το γράμμα α, αρχικό της λέξης acceleration.

Η επιτάχυνση στην πράξη. Η οικοδόμηση βέβαια μιας καινούριας έννοιας η οποία είναι και φυσικό μέγεθος πρέπει να περιέχει και μια πρόταση για τη μέτρησή της. Πώς θα μπορούσαμε πρακτικά να μετρήσουμε την τιμή της επιτάχυνσης; Ένας τρόπος είναι ο εξής:

Βασιζόμενοι στα ίχνη μιας ευθύγραμμης κίνησης υπολογίζουμε τη μέση επιτάχυνση σε χρονικό διάστημα το οποίο μπορεί να θεωρηθεί μικρό, σύμφωνα με την έννοια που δώσαμε προηγουμένως. Σε κάθε –υπό αυτή την έννοια– μικρό χρονικό διάστημα η τιμή της μέσης επιτάχυνσης μας δίνει τη ζητούμενη τιμή της επιτάχυνσης.

Ευθύγραμμη κίνηση με σταθερή επιτάχυνση

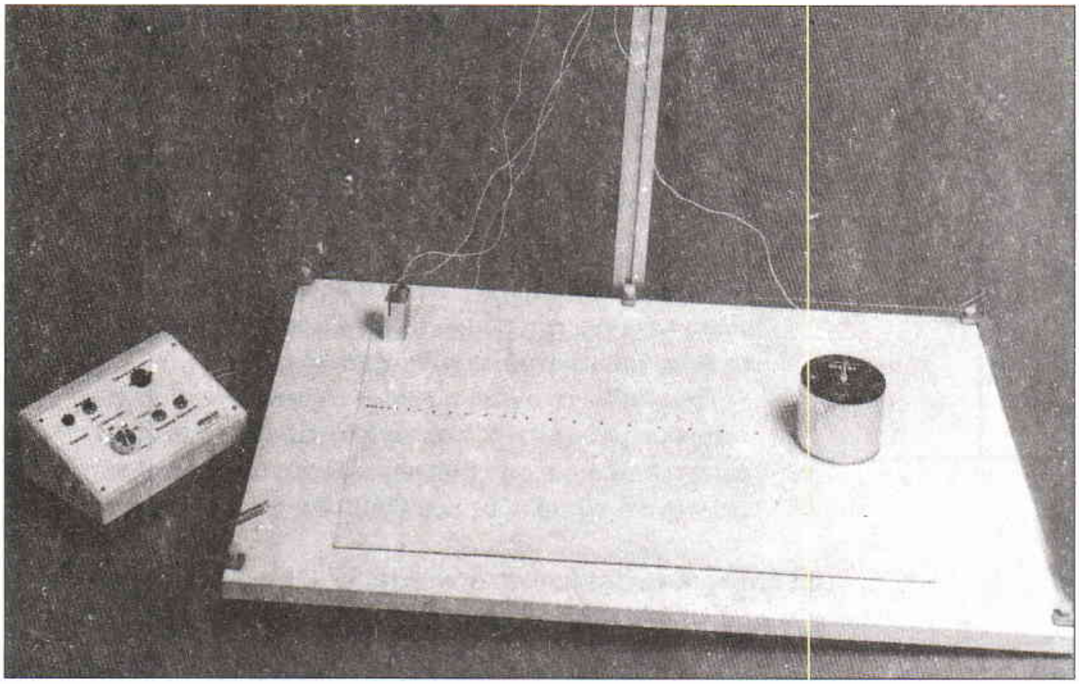
Τα γεγονότα. Ένα αυτοστηριζόμενο κυλινδρικό σώμα αφήνεται να κινηθεί σ' ένα κεκλιμένο επίπεδο τραπέζι. Το σημείο Α του κινητού διαγράφει την τροχιά που προκύπτει, αν ενώσουμε τα σημεία εγγραφής του A_1, A_2, A_3, ... A_9 πάνω στο χαρτί.



Η εγγραφή των σημείων A_1, A_2, A_3... A_9 παριστάνεται σε πραγματικές διαστάσεις. Τα ίσα χρονικά διαστήματα εγγραφής των σημείων είναι τ = 0.06 s. Παρατηρήσατε ότι η κίνηση είναι επιταχυνόμενη;

Διαπιστώνουμε ότι όλα τα σημεία βρίσκονται πάνω σε μια ευθεία, ενώ οι αποστάσεις ανάμεσα σε δύο διαδοχικές εγγραφές δεν είναι ίσες, όπως αυτό συμβαίνει στην ευθύγραμμη ομαλή κίνηση.

Η θεωρητική σκέψη. Οι μετρήσεις μας οδηγούν στο συμπέρασμα



ότι κατά την κίνηση η *ταχύτητα αυξάνεται ομοιόμορφα*, ανά ίσα δηλαδή χρονικά διαστήματα παρατηρείται η ίδια αύξηση. Με άλλα λόγια η μέση επιτάχυνση είναι σταθερή.

Σε μια ευθύγραμμη κίνηση σαν αυτήν, όπου οι τιμές της μέσης επιτάχυνσης είναι ίδιες για όλες τις χρονικές διάρκειες μετρήσεώς τους, η μέση επιτάχυνση είναι ίση με τη (στιγμιαία) επιτάχυνση. Η επιτάχυνση είναι συνεπώς σταθερή.

Ο ορισμός. *Κάθε ευθύγραμμη κίνηση με σταθερή επιτάχυνση λέγεται ευθύγραμμη ομαλά επιταχυνόμενη κίνηση.* Κατά την κίνηση αυτή η μεταβολή της ταχύτητας εκδηλώνεται με σταθερό ρυθμό, σε ίσα δηλαδή χρονικά διαστήματα συμβαίνουν ίσες μεταβολές.

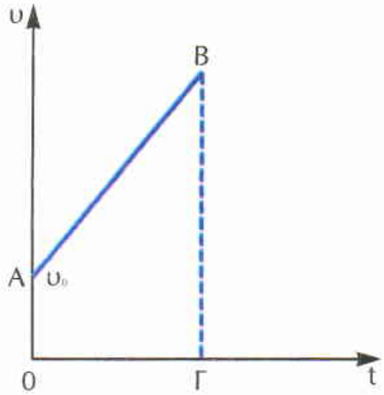
Η εξίσωση της ταχύτητας. Αν είναι υ_0 και υ οι τιμές της ταχύτητας τις χρονικές στιγμές t και t_0, θα ισχύει

$$\alpha_\mu = \alpha = \upsilon - \upsilon_0 / t - t_0 \text{ ή } \upsilon = \upsilon_0 + \alpha\,(t - t_0)$$

Αν δεχτούμε ότι $t_0 = 0$ η σχέση θα γίνει $\mathbf{\upsilon = \upsilon_0 + \alpha t}$. Αν δεχτούμε και ότι $\upsilon_0 = 0$ η σχέση γράφεται:

$$\mathbf{\upsilon = \alpha t}$$

Αξίζει να παρατηρήσουμε ότι στην εξίσωση $υ = υ_0 + αt$ η ταχύτητα που θα έχει στο μέλλον το κινούμενο αντικείμενο είναι άθροισμα



i) της ταχύτητας $\mathbf{υ_0}$ που είχε κατά την αρχή των χρόνων

και ii) της ποσότητας **αt** η οποία εκφράζει τη μεταβολή της ταχύτητας λόγω της επιτάχυνσης.

Η εξίσωση κίνησης. Ας αναζητήσουμε τώρα την εξίσωση κίνησης, την εξίσωση δηλαδή που θα μας δίνει τη θέση του κινητού σε κάθε χρονική στιγμή.

Θεωρούμε τη σχέση $υ = υ_0 + αt$ σαν τύπο συνάρτησης με μεταβλητές την ταχύτητα και τον χρόνο και σχεδιάζουμε τη γραφική παράσταση. Αποδεικνύεται ότι το εμβαδόν του ΟΑΒΓ θα μας δίνει την τιμή της μετατόπισης.

Το σχήμα είναι τραπέζιο οπότε $Δx = ½ (υ_0 + υ)\ t$.

Αλλά $υ = υ_0 + αt$ οπότε $Δx = υ_0 t + ½\ αt^2$.

Αν συμφωνήσουμε να είναι $x_0 = 0$ οπότε $Δx = x$ προκύπτει η εξίσωση

$$\mathbf{x = υ_0 t + ½ αt^2}$$

η οποία *μας δίνει τη θέση του κινητού σε κάθε μελλοντική στιγμή, για την ευθύγραμμη ομαλά επιταχυνόμενη κίνηση.*

Παρατηρήσεις

1. Η μετατόπιση $\mathbf{υ_0 t + ½\ αt^2}$ είναι άθροισμα

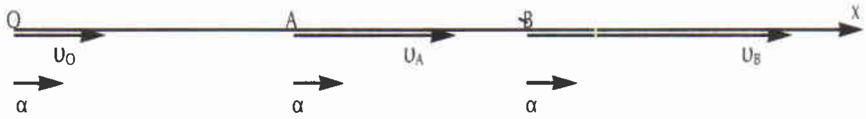
i) της μετατόπισης $\mathbf{υ_0 t}$ που θα παρουσίαζε το κινούμενο αντικείμενο αν δεν υπήρχε επιτάχυνση

και ii) της μετατόπισης $\mathbf{½\ αt^2}$ που θα παρουσίαζε το κινούμενο αντικείμενο λόγω της επιτάχυνσης

2. Στις δύο εξισώσεις $υ = υ_0 + αt$ και $x = υ_0 t + ½\ αt^2$ τα σύμβολα που αναφέρονται σε διανυσματικά μεγέθη παριστάνουν τις αντίστοιχες αλγεβρικές τιμές ως προς κάποιον άξονα x.

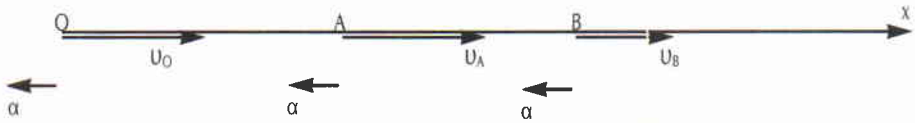
Αν θεωρήσουμε ότι $t_0 = 0$, $x_0 = 0$ και ότι ο προσανατολισμένος άξονας είναι έτσι ώστε $υ_0 > 0$, τότε:

α) εφόσον η κατεύθυνση της επιτάχυνσης συμπίπτει με εκείνη της αρχικής ταχύτητας, θα είναι $α > 0$.



Σ' αυτή την περίπτωση η ταχύτητα συνεχώς θα αυξάνεται και στις εξισώσεις $υ = υ_0 + αt$ και $x = υ_0t + ½αt^2$ όλα τα σύμβολα θα αντιστοιχούν σε *θετικές* ποσότητες.

β) εφόσον η κατεύθυνση της επιτάχυνσης είναι αντίθετη από εκείνη της αρχικής ταχύτητας ($υ_0>0$)



θα είναι $α<0$ (οπότε $α = -|α|$) και μπορούμε να γράφουμε τις δύο εξισώσεις με τη μορφή:

$υ = υ_0 - |α|t$ και $x = υ_0 t - ½ |α|t^2$.

Σ' αυτή την περίπτωση –μολονότι εκδηλώνεται μια συνεχής ελάττωση της ταχύτητας, το αντικείμενο δηλαδή κινείται όλο και πιο αργά– η κίνηση, στη γλώσσα της φυσικής, θεωρείται *κίνηση με σταθερή επιτάχυνση*. Σύμφωνα με τη φυσική, η παρουσία επιτάχυνσης σε μια ευθύγραμμη κίνηση μπορεί να προκαλέσει είτε αύξηση είτε ελάττωση της ταχύτητας.

3. Αν η αρχική ταχύτητα είναι ίση με μηδέν, η εξίσωση κίνησης παίρνει τη μορφή

$$x = \frac{1}{2}αt^2.$$

i) Αν είναι γνωστό ότι μια κίνηση είναι ομαλά επιταχυνόμενη τότε η εξίσωση αυτή μάς δίνει τη θέση (αλλά και τη μετατόπιση) του κινητού σε κάθε μελλοντική στιγμή. Παρατηρούμε μια αναλογία ανάμεσα στις τιμές της μετατόπισης και στα τετράγωνα του χρόνου.

ii) Αντίστροφα, για να αποδείξουμε ότι μια ευθύγραμμη κίνηση χωρίς αρχική ταχύτητα είναι ομαλά επιταχυνόμενη αρκεί να δείξουμε ότι οι μετατοπίσεις του κινητού είναι ανάλογες των τετραγώνων των χρόνων.

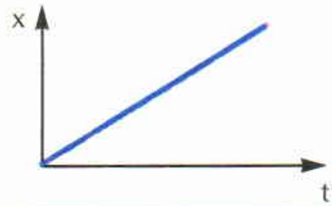
Αυτό έκανε και ο Γαλιλαίος όταν ερευνούσε την ελεύθερη πτώση.

Ευθύγραμμη ομαλή κίνηση ($x_0 = 0$, $t_0 = 0$)

Εξίσωση που μας δίνει τη θέση του αντικειμένου σε κάθε μελλοντική στιγμή.

$$x = \upsilon t$$

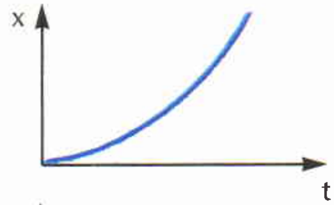
Η ταχύτητα παραμένει σταθερή



Ομαλά επιταχυνόμενη κίνηση ($x_0 = 0$, $t_0 = 0$, $\upsilon_0 = 0$)

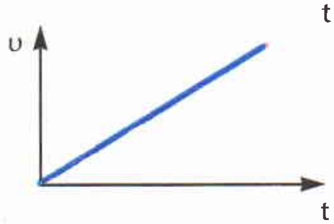
$$x = \frac{1}{2} \alpha t^2$$

εξίσωση που μας δίνει τη θέση του αντικειμένου σε κάθε μελλοντική στιγμή

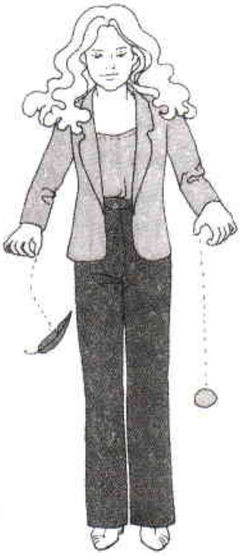


$$\upsilon = \alpha t$$

εξίσωση που μας δίνει την ταχύτητα του αντικειμένου σε κάθε μελλοντική στιγμή.



Η ελεύθερη πτώση



Αν αφήσουμε από το ίδιο ύψος και την ίδια στιγμή ένα φύλλο λεύκας κι ένα βαρύ βότσαλο, το βότσαλο σε σύγκριση με το φύλλο θα κινηθεί προς το έδαφος πολύ πιο γρήγορα.

Αν μας ρωτήσουν *«γιατί το βότσαλο πέφτει πιο γρήγορα;»* η απάντηση που μας έρχεται αυθόρμητα να δώσουμε (καθώς βρίσκεται κοντά στην κοινή λογική) είναι: *πέφτει πιο γρήγορα γιατί είναι βαρύτερο.*

Από τον Αριστοτέλη στον Γαλιλαίο

Όταν ο Γαλιλαίος άρχισε να ερευνά το φαινόμενο της πτώσης των σωμάτων η άποψη ότι *τα βαρύτερα πέφτουν πιο γρήγορα* κυριαρχούσε απόλυτα. Εκτός από το ότι σχετιζόταν με την κοινή λογική είχε και βαθιές ρίζες μέσα στο έργο του έλληνα φιλόσοφου Αριστοτέλη.

Η Αριστοτελική φυσική, την οποία διδάχτηκε ο Γαλιλαίος στο Πανεπιστήμιο της Πίζας, υποστήριζε ότι το υλικό όλων των επίγειων σωμάτων προέρχεται από την ανάμειξη των τεσσάρων «πρωταρχικών» στοιχείων. Τα τέσσερα στοιχεία, η Γη, το Ύδωρ, ο Αήρ και το Πυρ δεν πρέπει να ταυτίζονται στη σκέψη μας με τις ουσίες από τις οποίες πήραν το όνομά τους. Το κοινό νερό, για παράδειγμα, εθεωρείτο σαν ένα μείγμα των τεσσάρων στοιχείων στο οποίο επικρατούσε το στοιχείο Ύδωρ. Κάθε ένα από τα πρωταρχικά στοιχεία είχε τη φυσική του θέση μέσα στον επίγειο χώρο. Πιο ψηλά ήταν το Πυρ, κάτω από αυτό ο Αήρ, χαμηλότερα το Ύδωρ και πιο κάτω από όλα ήταν η φυσική θέση του στοιχείου Γη. Σύμφωνα, πάντα, με τη φυσική του Αριστοτέλη το κάθε στοιχείο εθεωρείτο ότι εμφανίζει την τάση να κινηθεί προς τη φυσική του θέση. Αν για παράδειγμα ένα σώμα, που περιέχει κυρίως το στοιχείο Πυρ, βρεθεί για κάποιο λόγο κάτω από το στοιχείο Αήρ, θα πρέπει να ανέβει πάνω απ' αυτό. Μια πέτρα που αφήνεται ελεύθερη στον αέρα θα κινηθεί προς το έδαφος και η κίνησή της θα είναι η συνέπεια της υπεροχής του στοιχείου Γη σε συνδυασμό με τη θέση στην οποία βρέθηκε.

Γενικότερα κυριαρχούσε η άποψη ότι η φυσική κίνηση ενός ο-

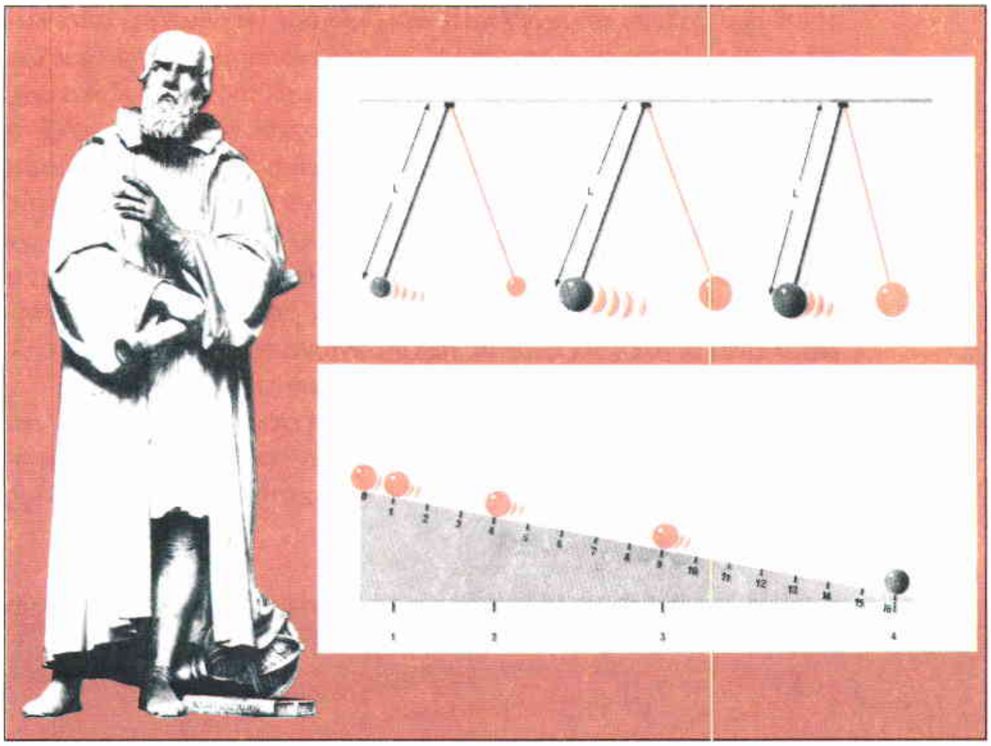
ποιουδήποτε σώματος καθορίζεται (α) από την αναλογία με την οποία τα τέσσερα πρωταρχικά στοιχεία συμμετέχουν στη σύνθεσή του και (β) από τη θέση που έχει σε κάποια στιγμή σε σχέση με τις φυσικές θέσεις των τεσσάρων στοιχείων.

Η ελεύθερη πτώση ενός σώματος εθεωρείτο κλασικό παράδειγμα φυσικής αυθόρμητης κίνησης. Σύμφωνα με την άποψη αυτή κάθε στερεό σώμα που αφήνεται ελεύθερο αποκτά μόνο του και σε σύντομο χρονικό διάστημα μια σταθερή ταχύτητα πτώσης την οποία στη συνέχεια διατηρεί μέχρι το τέλος της κίνησης. Ποιοι παράγοντες καθορίζουν αυτή την ταχύτητα; Ο Αριστοτέλης υποστήριζε ότι το βάρος του αντικειμένου συμβάλλει στον προσδιορισμό αυτής της ταχύτητας. Το συμπέρασμα ήταν μέσα στη λογική της γενικότερης θεωρίας σύμφωνα με την οποία η αιτία του βάρους είναι η παρουσία μέσα στο σώμα του πρωταρχικού στοιχείου Γη, το οποίο έχει τη φυσική τάση να κινείται προς τα κάτω. Έτσι, ένα αντικείμενο πιο βαρύ, δηλαδή ένα αντικείμενο που περιέχει μεγαλύτερη ποσότητα από το στοιχείο Γη, παρουσιάζει μια πιο έντονη τάση να κινηθεί προς τη «φυσική» του θέση από ένα άλλο και συνεπώς αποκτά μεγαλύτερη ταχύτητα πτώσης.

Στις αρχές του 17ου αιώνα η αντίληψη αυτή όχι μόνο είχε κυριαρχήσει αλλά είχε περίπου ενσωματωθεί στην κοινή λογική. Αν μάλιστα ληφθεί υπόψη και το κύρος του Αριστοτέλη, θα καταλάβουμε γιατί είχε φτάσει να θεωρείται αναμφισβήτητα «σωστή».

Ο Γαλιλαίος άργησε να αποκτήσει βεβαιότητα ότι το αναμφισβήτητο θα μπορούσε να αμφισβητηθεί. Τελικά την απέκτησε. Άρχισε να υποστηρίζει ότι εκείνο που καθυστερούσε τα ελαφριά σώματα, όπως ένα φύλλο δένδρου ή μια νιφάδα χιονιού, ήταν η «παρουσία» του αέρα. Αντίθετα, σε αντικείμενα σχετικά βαριά και συμπαγή οι συνέπειες της αντίστασης του αέρα γίνονταν σχετικά ασήμαντες. Το επόμενο νοητικό βήμα καθυστέρησε, αλλά τελικά πραγματοποιήθηκε. Ο Γαλιλαίος κατάφερε να φανταστεί ότι χωρίς την αντίσταση του αέρα τα αντικείμενα θα έπεφταν ταυτόχρονα και ότι ίσως ένας ενιαίος νόμος θα μπορούσε να ισχύει για την πτώση όλων των σωμάτων προς τη γη.

Δύο σοβαρά εμπόδια ορθώνονταν και έκαναν αδύνατη την απόδειξη. Το πρώτο ήταν ότι την εποχή εκείνη δεν είχαν ακόμη επινοηθεί μέθοδοι για τη δημιουργία ικανοποιητικού κενού. Το δεύτερο ήταν ότι τα σώματα «βιάζονταν» πάρα πολύ να φθάσουν στο έδαφος και οι χρονομετρήσεις με τα όργανα που διέθετε ήταν αδύνατο να δώσουν κάτι αξιόπιστο.



Ο Γαλιλαίος (Galileo Galilei) γεννήθηκε στην Πίζα το 1564 και έζησε μέχρι το 1642. Έμεινε στην Πάντοβα δέκα οχτώ χρόνια, τα πιο δημιουργικά και γόνιμα χρόνια της ζωής του. Εκεί έβαλε τα θεμέλια της σύγχρονης επιστήμης που έχει σχέση με τα κινούμενα σώματα.

Μπροστά στο αδιέξοδο ο Γαλιλαίος αξιοποίησε μια σκέψη φαινομενικά απλή. Χρησιμοποίησε ένα κεκλιμένο επίπεδο, πάνω στη λογική ότι ο χαρακτήρας της κίνησης μιας σφαίρας που κυλάει πάνω του είναι ίδιος με εκείνον της σφαίρας που πέφτει ελεύθερα. Το κεκλιμένο επίπεδο από τη μια περιόριζε την παρέμβαση του αέρα και από την άλλη έδινε την ευκαιρία για χρονομετρήσεις προσεκτικές και ελεγχόμενες. Πρέπει να έγιναν εκατοντάδες πειράματα με μπάλες που αφήνονταν να κυλήσουν σε αυλακώσεις πάνω σε σανίδες με ορισμένη κλίση ως προς τον ορίζοντα. Οι μετρήσεις των χρόνων γίνονταν με βάση την ποσότητα νερού που μαζευόταν καθώς έσταζε σταγόνα - σταγόνα από το δοχείο.

Ο ίδιος ο Γαλιλαίος γράφει: «...*Αφήσαμε την μπάλα να πέσει κατά μήκος της αυλάκωσης και σημειώσαμε το χρόνο που χρειάστηκε για να διανύσει όλο το επίπεδο. Τη διαδικασία αυτή επαναλάβαμε πολλές φορές, ώστε να είμαστε απόλυτα βέβαιοι για το*

ποσό του χρόνου το οποίο ποτέ δεν βρήκαμε να διαφέρει ούτε κατά το ένα δέκατο ενός σφυγμού. Ύστερα αφήσαμε την ίδια μπάλα να πέσει μόλις κατά το ένα τέταρτο του μήκους της αυλάκωσης και μετρήσαμε το χρόνο. Βρήκαμε ότι ο χρόνος αυτός αποτελεί το μισό ακριβώς του πρώτου. Στη συνέχεια κάναμε το ίδιο πείραμα και για άλλα μήκη και εξετάσαμε το χρόνο όλου του μήκους ως προς το χρόνο του μισού μήκους, των δύο τρίτων, των τριών τετάρτων και τελικά κάθε άλλης υποδιαίρεσης. Με πειράματα που τα επαναλάβαμε εκατό και πάνω φορές, βρέθηκε ότι τα διαστήματα είναι μεταξύ τους όπως τα τετράγωνα των χρόνων. Και τούτο φάνηκε ότι ισχύει για όλες τις κλίσεις του επιπέδου...».

Ταυτόχρονα, με μια όχι πολύ αυστηρή σειρά συλλογισμών και μαθηματικών σχέσεων, έδειξε λογικά ότι, αν τα διαστήματα είναι ανάλογα με τα τετράγωνα των χρόνων, η επιτάχυνση της κίνησης θα πρέπει να είναι σταθερή.

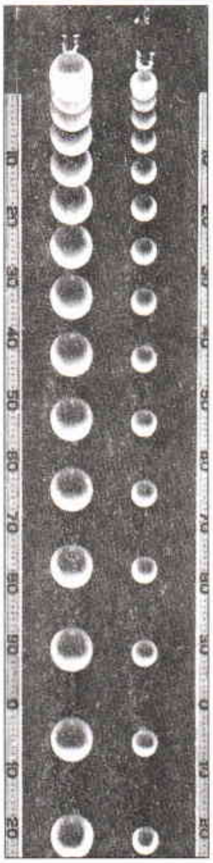


Πίνακας του G. Bezzuoli που παριστάνει ένα πείραμα του Γαλιλαίου στην Πίζα. Αριστερά και δεξιά, βρίσκονται οι αντίπαλοι του Γαλιλαίου. Δεξιά είναι ο πρίγκιπας Τζοβάνι των Μεδίκων και αριστερά οι εκπρόσωποι του Ακαδημαϊκού δογματισμού σκυμμένοι πάνω σε κείμενο του Αριστοτέλη. Ο Γαλιλαίος είναι περίπου στο κέντρο –ο ψηλότερος– περιτριγυρισμένος από τους μαθητές του.



Παρ' όλες τις αδυναμίες στο ζήτημα της απόλυτης πειστικότητας, η προσπάθεια του Γαλιλαίου να προσεγγίσει με τέτοιο τρόπο ένα νόμο της φύσης έχει διαστάσεις ιστορικές. **Ο συνδυασμός της πειραματικής δουλειάς με τη μαθηματική ανάλυση έδωσε το πρώτο καθαρό παράδειγμα των μεθόδων της νέας επιστήμης που θα αναπτυσσόταν με εξαιρετική επιτυχία στους αιώνες που ακολούθησαν.**

Στη διάρκεια της ζωής του Γαλιλαίου η δημιουργία «κενού» δεν πραγματοποιήθηκε ποτέ. Λίγα χρόνια αργότερα (1650) στο Μαγδεμβούργο της Γερμανίας ο Otto von Guericke (Όττο φον Γκέρικε) πέτυχε να κατασκευάσει την πρώτη αντλία κενού. Στο ικανοποιητικό κενό που δημιουργήθηκε «αυθαδιάζοντας» σε μια ακόμα Αριστοτελική άποψη –ότι η φύση απεχθάνεται το κενό– τα αναμμένα κεριά έσβηναν, τα ζώα πέθαιναν, ο ήχος ήταν αδύνατο να μεταδοθεί.



Λίγο αργότερα κατασκευάστηκε και ο γυάλινος σωλήνας κενού, μέσα στον οποίο δύο οποιουδήποτε βάρους αντικείμενα έπεφταν ταυτόχρονα φθάνοντας στη βάση του σωλήνα την ίδια στιγμή και με την ίδια ταχύτητα. Στα 1970 ο αστροναύτης David R. Scott εκτέλεσε το πείραμα της ελεύθερης πτώσης στο κενό πάνω στην επιφάνεια του φεγγαριού. Ένα ελαφρύ φτερό κι ένα σφυρί πολύ βαρύτερο αφέθηκαν από τα χέρια του ταυτόχρονα και συνάντησαν το σεληνιακό έδαφος την ίδια ακριβώς στιγμή.

Ο νόμος της ελεύθερης πτώσης

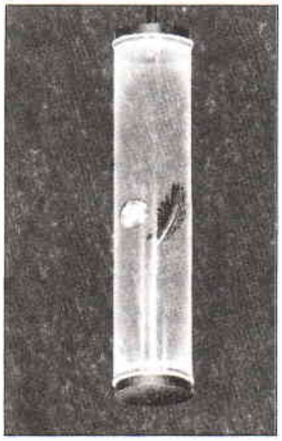
Από το «υδροχρονόμετρο» του Γαλιλαίου μέχρι τα μέσα που διαθέτει η σύγχρονη εποχή, η απόσταση είναι φυσικά τεράστια. Σήμερα, με τη στροβοσκοπική μέθοδο «προλαβαίνουμε», χωρίς να χρειαστεί να επινοήσουμε το κεκλιμένο επίπεδο.

Με στροβοσκόπια, που δημιουργούν 30 φλας ανά δευτερόλεπτο, μπορούμε να παίρνουμε φωτογραφίες μιας μικρής σφαίρας που πέφτει και να **διαπιστώνουμε ότι τα διαστήματα είναι ανάλογα με τα τετράγωνα των χρόνων.**

Η πτώση ενός σώματος στο κενό λέγεται *ελεύθερη πτώση*. Πειραματικά αποδεικνύεται ότι:

α) *Στο κενό όλα τα σώματα πέφτουν ταυτόχρονα*

β) *Η ελεύθερη πτώση κάθε σώματος είναι ευθύγραμμη ομαλά επιταχυνόμενη κίνηση.*



Με τις δύο προηγούμενες προτάσεις διατυπώνεται ο λεγόμενος νόμος της ελεύθερης πτώσης.

Εφόσον επιλέξουμε κατάλληλο σύστημα αναφοράς (με κατακόρυφο άξονα) η κίνηση κάθε αντικειμένου που πέφτει στο κενό περιγράφεται με τις εξισώσεις

$$\mathbf{y} = \frac{1}{2}\mathbf{g}\mathbf{t}^2 \qquad \mathbf{\upsilon} = \mathbf{g}\mathbf{t}$$

στις οποίες το σύμβολο **y** παριστάνει τη θέση του αντικειμένου και το **υ** την ταχύτητά του κατά τη χρονική στιγμή **t** εφόσον θεωρηθεί ως αρχή των χρόνων η στιγμή που αφέθηκε να πέσει. Το σύμβολο **g** παριστάνει τη βαρυτική επιτάχυνση η οποία ι) κατά τη διάρκεια της πτώσης παραμένει σταθερή και ιι) είναι ανεξάρτητη από το βάρος του σώματος το οποίο πέφτει.

Στο μεταξύ ακριβείς μετρήσεις έδειξαν ότι, αν περιοριστούμε στην επιφάνεια της θάλασσας, η τιμή της βαρυτικής επιτάχυνσης παρουσιάζει μια αύξηση με το γεωγραφικό πλάτος. Στον ισημερινό το g είναι 9,78 m/s^2, στο γεωγραφικό πλάτος που βρίσκεται η Ελλάδα γίνεται 9,81 m/s^2 ενώ στο Βόρειο Πόλο φτάνει την τιμή 9,83 m/s^2. Το μολύβι που θα πέσει από τα χέρια ενός Σουηδού μαθητή βιάζεται λίγο περισσότερο να συναντηθεί με το έδαφος, σε σχέση με ένα μολύβι που θα πέσει στο έδαφος του Περού.

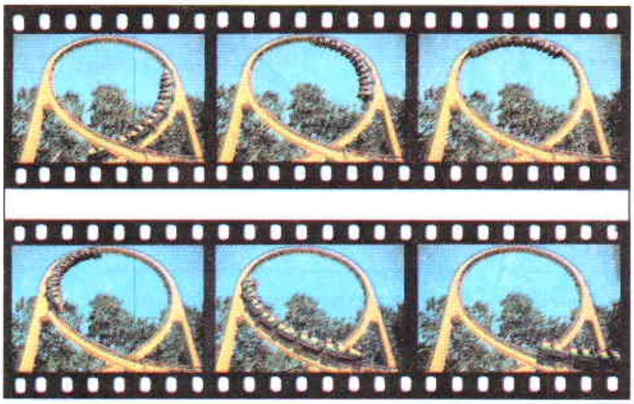
Οι καμπυλόγραμμες κινήσεις

Όταν ξεκινούσαμε το *κεφάλαιο περιγραφή της κίνησης* μιλούσαμε για ηλεκτρόνια που κινούνταν γύρω από πυρήνες και για φύλλα που πέφτουν το φθινόπωρο. Στα πιο πολλά απ' τα παραδείγματα, οι κινήσεις δεν είχαν το γνώρισμα της ευθύγραμμης τροχιάς.

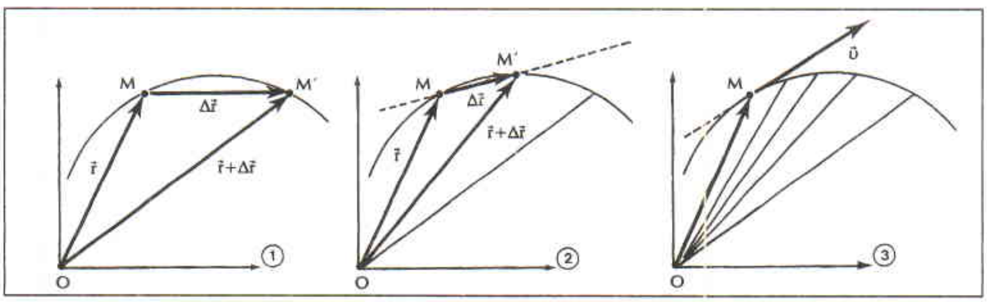
Παρ' όλα αυτά, μέχρι τώρα περιοριστήκαμε μόνο στις ευθύγραμμες κινήσεις κι αυτό το κάναμε σκόπιμα. Είναι πιο απλές στην περιγραφή τους και ταυτόχρονα αναγκαίο σκαλοπάτι για να αντιμετωπίσουμε τις πολύπλοκες καμπυλόγραμμες κινήσεις που παρουσιάζονται στη φύση.

Τώρα θα προχωρήσουμε λίγο παραπέρα. Θα ασχοληθούμε με τις επίπεδες καμπυλόγραμμες κινήσεις, αλλά κι αυτό δεν θα 'ναι παρά μια προετοιμασία για την περιγραφή των κυκλικών κινήσεων.

Η ταχύτητα. Στις ευθύγραμμες κινήσεις παρακολουθήσαμε την οικοδόμηση ενός μεγέθους, το οποίο δίνει απάντηση στα ερωτήματα «πόσο γρήγορα» και «προς τα πού» κινείται ένα αντικείμενο. Το διανυσματικό αυτό μέγεθος το είπαμε ταχύτητα.



Όταν ένα κινητό βρίσκεται σε καμπύλη τροχιά, η ανάγκη να δοθεί έμφαση στον διανυσματικό χαρακτήρα της ταχύτητας είναι πολύ μεγαλύτερη. Το κινητό διαρκώς «στρίβει» δηλαδή αλλά-

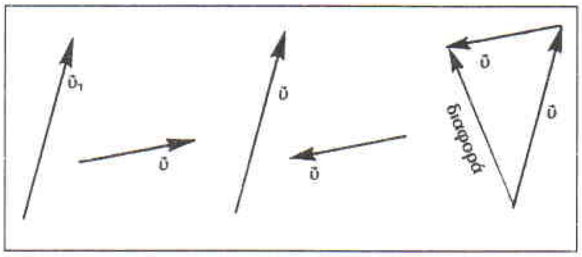


ΦΥΣΙΚΗ

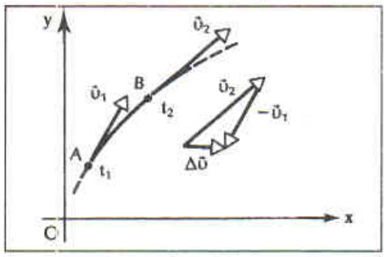
ζει αδιάκοπα κατεύθυνση και από στιγμή σε στιγμή χρειαζόμαστε μια καινούρια πληροφορία για το «προς τα πού» κινείται.

Για να περιγράψουμε μια επίπεδη καμπυλόγραμμη κίνηση χρειαζόμαστε ένα ορθογώνιο σύστημα αξόνων xOy. Παρακολουθούμε ένα κινητό. Τη χρονική στιγμή t βρίσκεται στο σημείο Μ, ενώ μετά από χρόνο Δt, είναι στο σημείο Μ′ και η μετατόπιση του $\overrightarrow{MM'} = \overrightarrow{\Delta r}$. Όπως και στις ευθύγραμμες κινήσεις, το πηλίκο της μετατόπισης $\overrightarrow{\Delta r}$ προς τη διάρκεια Δt λέγεται μέση ταχύτητα ($υ_μ$) του κινητού από τη στιγμή t μέχρι τη στιγμή t + Δt. Το μέγεθος αυτό δεν είναι αποτελεσματικό στο να δώσει πληροφορίες για την καμπυλόγραμμη κίνηση, είναι όμως αναγκαίο, γιατί με βάση αυτό μπορούμε να ορίσουμε το ιδιαίτερα ενδιαφέρον μέγεθος *στιγμιαία ταχύτητα*.

Η ταχύτητα σε μια χρονική στιγμή ορίζεται με συλλογισμό ανάλογο προς εκείνον που κάναμε στην ευθύγραμμη κίνηση, δηλαδή σαν όριο της μέσης ταχύτητας, όταν το Δt τείνει στο μηδέν. Στην περίπτωση όμως της καμπυλόγραμμης κίνησης, όταν το Δt τείνει στο μηδέν, το διάνυσμα της μετατόπισης τείνει να γίνει εφαπτόμενο της τροχιάς. Αυτό σημαίνει ότι το διάνυσμα που περιστάνει τη στιγμιαία ταχύτητα εφάπτεται στην τροχιά στο σημείο Μ στο οποίο αναφέρεται και έχει την κατεύθυνση της κίνησης.



Για να αφαιρέσουμε από ένα διάνυσμα $\vec{υ}$ ένα διάνυσμα $\vec{υ}'$, προσθέτουμε στο $\vec{υ}$ το αντίθετο τού $\vec{υ}'$.



Να προσέξουμε ότι το διάνυσμα $\Delta\vec{υ}$ έχει κατεύθυνση πάντα προς το κοίλο μέρος της τροχιάς.

Η επιτάχυνση. Είναι φανερό ότι στις καμπυλόγραμμες κινήσεις η ταχύτητα μεταβάλλεται –τουλάχιστον κατά την κατεύθυνσή της– από στιγμή σε στιγμή. Κατά την κίνηση ανάμεσα σε δύο θέσεις Α (ταχύτητα $\vec{υ}_1$) και Β (ταχύτητα $\vec{υ}_2$) η μεταβολή της ταχύτητας παριστάνεται με τη διαφορά των διανυσμάτων $\vec{υ}_2$ και $\vec{υ}_1$.

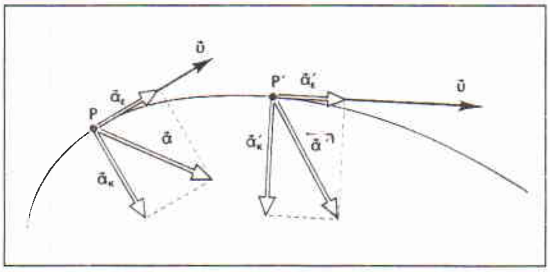
Το πηλίκο της μεταβολής προς τον χρόνο που αυτή πραγματοποιήθηκε αποτελεί τη μέση επιτάχυνση του κινητού $\vec{α}_μ = \Delta\vec{υ} / \Delta t$. Όπως και στην ευθύγραμμη κίνηση, στιγμιαία επιτάχυνση ονομάζεται το όριο, προς το οποίο τείνει η μέση επιτάχυνση, όταν το Δt

τείνει στο μηδέν.

Σε αντίθεση με το διάνυσμα της ταχύτητας που είναι εφαπτόμενο στην τροχιά, το διάνυσμα της επιτάχυνσης κατευθύνεται πάντοτε προς το κοίλο μέρος της τροχιάς.

Δύο ενδιαφέρουσες συνιστώσες της επιτάχυνσης. Η περιγραφή των καμπυλόγραμμων κινήσεων μπορεί να εξυπηρετηθεί από την ανάλυση της ταχύτητας και της επιτάχυνσης σε συνιστώσες παράλληλες προς τους άξονες x και y.

Ειδικά όμως για την επιτάχυνση, μεγαλύτερο ενδιαφέρον, από φυσική σκοπιά, παρουσιάζει η ανάλυσή της σε **επιτρόχια** και **κεντρομόλο** συνιστώσα.



Η ανάλυση αυτή γίνεται σε δύο άξονες ορθογώνιους με αρχή το σημείο της τροχιάς, στο οποίο βρίσκεται κάθε φορά το κινητό. Είναι δηλαδή άξονες κινητοί. Ο ένας έχει την κατεύθυνση της ταχύτητας και ο άλλος κατευθύνεται προς το κοίλο της τροχιάς.

Κατ' αυτόν τον τρόπο προκύπτουν δύο συνιστώσες. Η επιτρόχια συνιστώσα $\vec{\alpha}_\varepsilon$ με τη διεύθυνση της ταχύτητας (και φορά που μπορεί να είναι και αντίθετη) και η κεντρομόλος συνιστώσα $\vec{\alpha}_\kappa$ με κατεύθυνση προς το κοίλο της τροχιάς.

Οι δύο αυτές συνιστώσες παρουσιάζουν ένα ειδικό ενδιαφέρον. Κι αυτό γιατί μέσα από μια σειρά συλλογισμών –που η παρουσίασή τους ξεπερνάει τις προθέσεις του βιβλίου– οδηγούμαστε στο συμπέρασμα ότι κάθε μια συνιστώσα έχει έναν ειδικό ρόλο στο ζήτημα της μεταβολής της ταχύτητας.

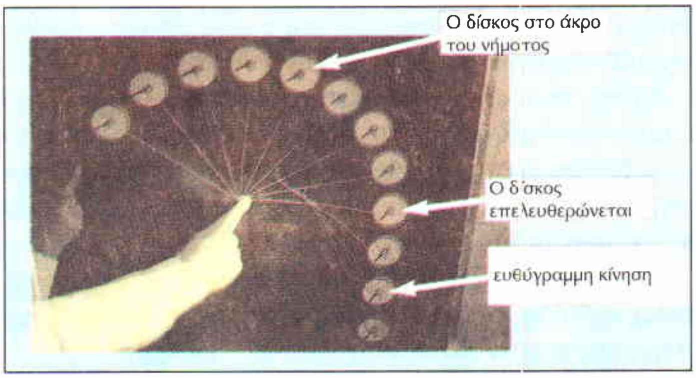
Ο αποκλειστικός ρόλος της επιτρόχιας συνιστώσας, που μπορούμε να τη λέμε και επιτρόχια επιτάχυνση, είναι να μεταβάλλει το μέτρο της ταχύτητας.

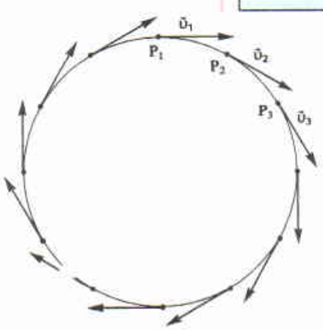
Απ' την άλλη, **η κεντρομόλος συνιστώσα** (ή κεντρομόλος επιτάχυνση) **ευθύνεται μόνο για τη μεταβολή στην κατεύθυνση της ταχύτητας.** Θα μπορούσαμε να πούμε ότι «στρίβει» το διάνυσμα της ταχύτητας χωρίς να μεταβάλλει το μέτρο της. Στις ευθύγραμμες κινήσεις, για παράδειγμα, δεν υπάρχει κεντρομόλος επιτάχυνση, ενώ είναι αδύνατο να πραγματοποιηθεί κίνηση καμπυλόγραμμη χωρίς κεντρομόλο επιτάχυνση.

Η κυκλική κίνηση

Σε πάρα πολλά μοντέλα, που επινόησαν οι άνθρωποι για να εξηγήσουν τα ουράνια φαινόμενα, οι κυκλικές κινήσεις είχαν μια θέση, θα μπορούσαμε να πούμε, προνομιακή. Για την αρχαία ελληνική σκέψη η κυκλική δεν ήταν μια οποιαδήποτε κίνηση. Ήταν η «τέλεια» κίνηση, η χωρίς αρχή και τέλος κίνηση, που επαναλαμβάνεται ασταμάτητα. Ήταν η κίνηση που επικρατούσε στους ουρανούς. Για τον Πλάτωνα το σχήμα τού Κόσμου ήταν σφαιρικό και όλες οι κινήσεις γίνονταν σε κύκλους με ομοιόμορφη ταχύτητα. Με τη συμβολή και του Αριστοτέλη η άποψη αυτή αποτέλεσε δόγμα, που θα χρειαζόταν δύο περίπου χιλιετηρίδες για να αμφισβητηθεί.

Τα γεγονότα. ι) Ο δίσκος της χρονοφωτογραφίας κινείται πάνω σε αεροτράπεζα στην άκρη νήματος. ιι) Οι μετρήσεις μάς δείχνουν ότι σε ίσους χρόνους το αντικείμενο αυτό διανύει ίσες αποστάσεις. ιιι) Σε κάποια στιγμή ο δίσκος απελευθερώνεται από το νήμα οπότε αρχίζει να κινείται ευθύγραμμα κατά την εφαπτομένη της τροχιάς.





Η θεωρητική σκέψη. ι) Αν θεωρήσουμε το κεντρικό σημείο του δίσκου (όπου προσδένεται το νήμα) ως σημειακό αντικείμενο μπορούμε να αντικρίσουμε την τροχιά του σαν τμήμα ενός κύκλου γεωμετρικού και τις διαγραφόμενες διαδρομές του ως διαγραφόμενα τόξα.

ιι) Βασιζόμενοι στις μετρήσεις διαπιστώνουμε ότι κάθε φορά που διαιρούμε το μήκος του οποιουδήποτε διαγραφόμενου τόξου προς τον αντίστοιχο χρόνο βρίσκουμε το ίδιο α-

ποτέλεσμα. Σύμφωνα δε με όσα είπαμε στις καμπυλόγραμμες κινήσεις το σταθερό αυτό πηλίκο είναι ίσο με το μέτρο της ταχύτητας.

iii) Το γεγονός ότι το αντικείμενο μόλις απελευθερώνεται κινείται εφαπτομενικά ενισχύει την ιδέα ότι η ταχύτητα κατά την κυκλική κίνηση είναι διάνυσμα εφαπτόμενο στην τροχιά.



Ο ορισμός. Κάθε κίνηση με κυκλική τροχιά και με σταθερό μέτρο ταχύτητας λέγεται **ομαλή κυκλική κίνηση.**

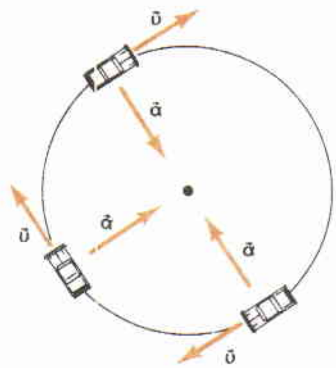
Στην ομαλή κυκλική κίνηση το μέτρο της ταχύτητας (υ) υπολογίζεται από το οποιοδήποτε πηλίκο διαγραφόμενου τόξου (s) προς τον αντίστοιχο χρόνο (t)

$$υ = \frac{s}{t}$$

Το διάνυσμα της ταχύτητας εφάπτεται στην κυκλική τροχιά και έχει την κατεύθυνση της κίνησης.

Η ομαλή κυκλική κίνηση είναι... επιταχυνόμενη. Στην κίνηση που περιγράφουμε υπάρχει, λοιπόν, ένας σταθερός ρυθμός στο ζήτημα τού *πόσο γρήγορα.* Αυτό ακριβώς μας κάνει να την χαρακτηρίζουμε *ομαλή.* Από την άλλη, όμως, όπως όλες οι καμπυλόγραμμες κινήσεις, η ομαλή κυκλική είναι κι αυτή μία κίνηση με επιτάχυνση. *Η κατεύθυνση της ταχύτητας μεταβάλλεται αδιάκοπα, παρ' όλο που το μέτρο της διατηρείται σταθερό.* Η σταθερότητα αυτή συνδέεται με το γεγονός ότι η επιτρόχια επιτάχυνση είναι ίση με μηδέν. Μοναδική επιτάχυνση είναι η κεντρομόλος που κατευθύνεται πάντοτε προς το κέντρο της κυκλικής τροχιάς.

Έχουμε λοιπόν μία κίνηση που, ενώ τη λέμε *ομαλή,* ταυτόχρονα δεχόμαστε ότι έχει επιτάχυνση. Αυτό μας φέρνει ίσως με αμηχανία, γιατί είναι δύσκολο να δεχτούμε ότι μια τέτοια κίνηση, στην οποία ένα υποθετικό ταχύμετρο θα ήταν «κολλημένο» στην ίδια ένδειξη, μάς παρουσιάζεται με επιτάχυνση. Ας μην ξεχνάμε όμως ότι η γλώσσα της φυσικής δεν είναι απόλυτα ταυτισμένη με τη γλώσσα της καθημερινότητας στην οποία η λέξη *επιτάχυνση* υπονοεί ότι κάτι κινείται ολοένα πιο γρήγορα.



Στην ομαλή κυκλική κίνηση υ-

πάρχει μόνο η κεντρομόλος επιτάχυνση, η οποία δεν σχετίζεται με τη λογική του *πιο γρήγορα* αλλά με την αδιάκοπη μεταβολή στην κατεύθυνση της ταχύτητας. Αποδεικνύεται θεωρητικά ότι το μέτρο της σχετίζεται με το μέτρο της ταχύτητας και με το μήκος της ακτίνας, σύμφωνα με την εξίσωση

$$\alpha_\kappa = \frac{\upsilon^2}{R}$$

Η ομαλή κυκλική κίνηση είναι μία κίνηση περιοδική. Στο πρώτο κεφάλαιο, στην ενότητα για τον χρόνο, μιλήσαμε για φαινόμενα που επαναλαμβάνονται με σταθερούς ρυθμούς και τα χαρακτηρίσαμε *περιοδικά*. Είπαμε ακόμα ότι η περίοδος και η συχνότητα είναι τα βασικά «στοιχεία ταυτότητας» για κάθε περιοδικό φαινόμενο.

Μπορούμε τώρα να ισχυριστούμε ότι η ομαλή κυκλική κίνηση είναι μια κίνηση περιοδική. Κι αυτό γιατί το κινητό ανά ίσα χρονικά διαστήματα ξαναβρίσκεται στη θέση του επανακτώντας την ίδια ακριβώς ταχύτητα και επιτάχυνση που είχε, όταν βρισκόταν στην προηγούμενη αυτή θέση. Κάθε ομαλή κυκλική κίνηση χαρακτηρίζεται, συνεπώς, από κάποια περίοδο και κάποια συχνότητα. Μπορούμε μάλιστα να προσαρμόσουμε τους ορισμούς των δύο μεγεθών στην περίπτωση αυτής της κίνησης και να λέμε ότι:

Περίοδος (T) ονομάζεται ο χρόνος που απαιτείται για να διαγραφεί μια περιφέρεια ενώ **συχνότητα (ν)** το πηλίκο του αριθμού (N) των περιστροφών που διαγράφονται σε χρόνο t προς τον χρόνο t.

Είναι $\nu = N/t$ και επειδή για $t = T$ θα είναι $N = 1$, προκύπτει ότι

$$\nu = \frac{1}{T}$$

Μπορούμε ακόμα να συσχετίσουμε την περίοδο με την ταχύτητα στην ομαλή κυκλική κίνηση. Σε χρόνο κίνησης $t = T$ (ίσο με την περίοδο) το αντικείμενο διαγράφει τόξο ίσο με $2\pi R$, όπου R η ακτίνα της τροχιάς. Βασιζόμενοι, επομένως, στην εξίσωση $\upsilon = s / t$ μπορούμε να καταλήξουμε στην:

$$\upsilon = \frac{2\pi R}{T}$$

Μονάδα για την περίοδο είναι φυσικά το 1 s. Η συχνότητα μετριέται με τη μονάδα 1Hz, που σημαίνει μία στροφή ανά δευτερόλεπτο ($1Hz = 1\ s^{-1}$). Οι μηχανολόγοι χρησιμοποιούν τη μονάδα 1 rpm που θα πει μία στροφή ανά λεπτό.

Οι σύνθετες κινήσεις

Το αεροπλάνο εκτελεί το συνηθισμένο του δρομολόγιο. Η αεροσυνοδός, καθώς σερβίρει τους επιβάτες, κινείται μέσα στο αεροπλάνο, ενώ ταυτόχρονα παίρνει μέρος στην πτήση. Η κίνηση της αεροσυνοδού θεωρείται σύνθετη. Κάτι ανάλογο συμβαίνει και με τον επιβάτη ενός κινούμενου τρένου καθώς αναζητεί τη θέση του. Γενικεύουμε. Ένα σώμα είναι δυνατόν να συμμετέχει σε πολλές κινήσεις. Για να μπορέσουμε να διακρίνουμε την κάθε μία από αυτές, χρειάζεται να παραμερίζουμε με τη φαντασία μας όλες τις υπόλοιπες οπότε θα καταλαβαίνουμε ποια είναι η κάθε μία κίνηση χωριστά.

Τα παραδείγματα με μεταφορικά μέσα προσφέρονται. Σ' ένα εμπορικό πλοίο, που ταξιδεύει, ο λοστρόμος ανεβαίνει μία σκάλα. Θεωρώντας τη Γη ακίνητη, μπορούμε να πούμε ότι αυτός συμμετέχει σε δύο κινήσεις. Η μία είναι η κατακόρυφη κίνηση, που θα εκτελούσε αν ανέβαινε τη σκάλα και το πλοίο ήταν ακίνητο. Η άλλη είναι μία κίνηση με την ταχύτητα του πλοίου, εκείνη δηλαδή που θα εκτελούσε αν βρισκόταν στο κινούμενο πλοίο, χωρίς να μετακινείται μέσα σ' αυτό.

Η αρχή της ανεξαρτησίας

Ας δούμε τώρα ποια μέθοδο χρησιμοποιεί η Κινηματική για να περιγράψει τις σύνθετες κινήσεις. Βασικό ερώτημα παραμένει το «που βρίσκεται ένα κινητό», το οποίο στην περίπτωσή μας συμμετέχει σε πολλές κινήσεις. Κι ακόμα ο υπολογισμός των μεγεθών που βοηθούν στην περιγραφή, όπως η ταχύτητα και η επιτάχυνση.

Τα προβλήματα αυτά αντιμετωπίζονται από την Κινηματική με τη λεγόμενη «αρχή της ανεξαρτησίας (ή της επαλληλίας) των κινήσεων».

«Όταν ένα κινητό εκτελεί ταυτόχρονα πολλές κινήσεις κάθε μία από αυτές εξελίσσεται ανεξάρτητα από τις άλλες». Ας εξειδικεύσουμε το νόημα της αρχής αυτής για καθένα από τα παρακάτω προβλήματα.

α. Για τον προσδιορισμό της θέσης.

Η θέση ενός κινητού –το οποίο συμμετέχει σε πολλές κινήσεις–

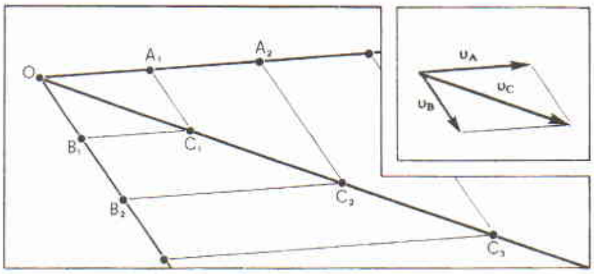
μετά από χρόνο t καθορίζεται αν φανταστούμε το κινητό να εκτελεί κάθε μία κίνηση ανεξάρτητα και διαδοχικά επί τον ίδιο χρόνο t.

β. Σχετικά με τον υπολογισμό της ταχύτητας (και της επιτάχυνσης).

Η ταχύτητα (και η επιτάχυνση) την οποία θα παρουσιάσει το κινητό, μετά από χρόνο t, υπολογίζεται από το διανυσματικό άθροισμα των ταχυτήτων (ή των επιταχύνσεων), που θα είχε το κινητό, αν εκτελούσε κάθε μία κίνηση ανεξάρτητα και επί χρόνο t. Μπορούμε να γράψουμε:

$$\vec{\upsilon} = \vec{\upsilon}_1 + \vec{\upsilon}_2 + \ldots + \vec{\upsilon}_\nu \text{ και } \vec{\alpha} = \vec{\alpha}_1 + \vec{\alpha}_2 + \ldots + \vec{\alpha}_\nu$$

Παραδείγματα

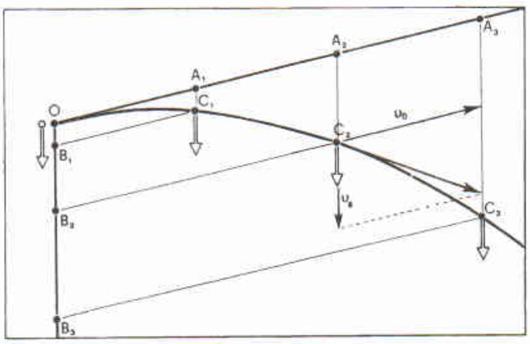


1. Από τη σύνθεση δύο ευθύγραμμων και ομαλών κινήσεων προκύπτει κίνηση ευθύγραμμη ομαλή. Ένα σαλιγκάρι, για παράδειγμα, που μετακινείται με σταθερή ταχύτητα $\vec{\upsilon}_B$ σε σχέση με κινούμενη βάση από ένα φύλλο χαρτί, η οποία κινείται κι αυτή με ταχύτητα σταθερή $\vec{\upsilon}_A$, εκτελεί κίνηση ευθύγραμμη ομαλή. Εφόσον η $\vec{\upsilon}_A$ και η $\vec{\upsilon}_B$, είναι σταθερές, θα είναι σταθερή και η $\vec{\upsilon}_C$.

$$\vec{\upsilon}_C = \vec{\upsilon}_A + \vec{\upsilon}_B$$

Μόνο στην περίπτωση που $\vec{\upsilon}_A = -\vec{\upsilon}_B$, προκύπτει ταχύτητα μηδέν.

2. Από τη σύνθεση μίας ευθύγραμμης ομαλής και μίας ευθύγραμμης ομαλά επιταχυνόμενης προκύπτει, στη γενική περίπτωση, κίνηση σε τροχιά που είναι γνωστή ως «παραβολική», όπως η κίνηση ενός μικρού αντικειμένου που βάλλεται (όχι κατακόρυφα) μέσα στο πεδίο βαρύτητας ή η κίνηση ενός σημειακού φορτίου που βάλλεται αντίστοιχα μέσα σε ομογενές ηλεκτρικό πεδίο. Εξαίρεση αποτελούν οι περιπτώσεις στις οποίες οι δύο κινήσεις έχουν την ίδια κατεύθυνση, οπότε η κίνηση που προκύπτει είναι ευθύγραμμη ομαλά μεταβαλλόμενη.



3. Από τη σύνθεση μιας ευθύγραμμης ομαλής K_1 και μιας ομαλής κυκλικής K_2.

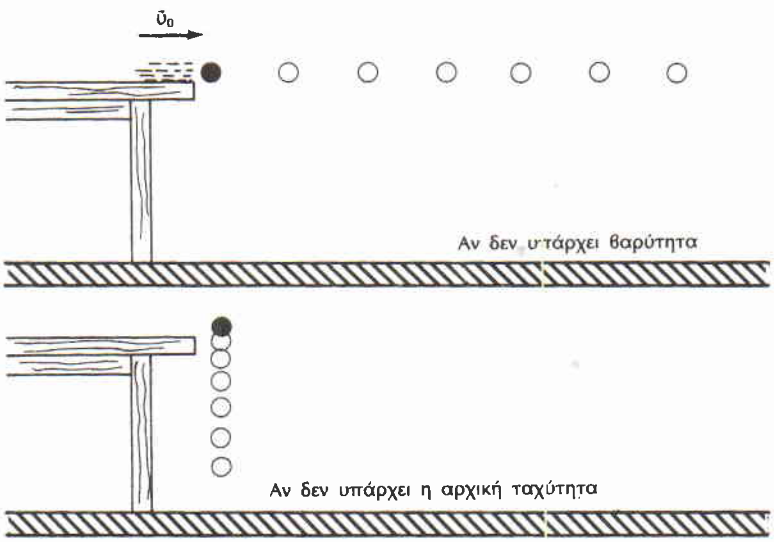
α. Στην περίπτωση που η ταχύτητα της K_1 είναι κάθετη στο επίπεδο της K_2, προκύπτει ελικοειδής κίνηση. Τέτοια κίνηση θα εκτελέσει ένα ηλεκτρόνιο αν εμφανιστεί σε ομογενές μαγνητικό πεδίο με ταχύτητα που δεν είναι ούτε παράλληλη ούτε κάθετη στη διεύθυνση των δυναμικών γραμμών.

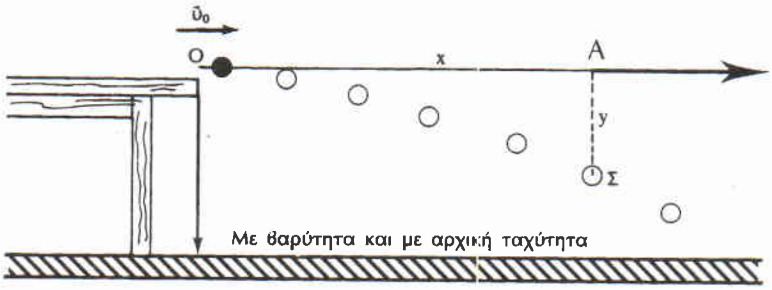
β. Στην περίπτωση που η ταχύτητα της K_1 βρίσκεται στο επίπεδο της K_2 προκύπτει η λεγόμενη κυκλοειδής τροχιά. Τέτοια κίνηση εκτελεί ένα τυχαίο σημείο του τροχού σ' ένα κινούμενο ποδήλατο.

Η περίπτωση της οριζόντιας βολής

Η αρχή της ανεξαρτησίας των κινήσεων παρουσιάζει ενδιαφέρον και για έναν ακόμα λόγο. Ας τον προσέξουμε. Μια οποιαδήποτε κίνηση μπορούμε να την αναλύσουμε σε κινήσεις απλές, να εφαρμόσουμε τη θεωρία και να προχωρήσουμε στην περιγραφή της.

Το παράδειγμα μιας βολής στο πεδίο βαρύτητας είναι χαρακτηριστικό. Μια μικρή μπίλια εκσφενδονίζεται με οριζόντια ταχύτητα υ_0 από την άκρη Ο ενός τραπεζιού. Την κίνηση που επακολουθεί μπορούμε να τη θεωρήσουμε ότι προέρχεται από σύνθεση δύο κι-





νήσεων. Ας τις ξεχωρίσουμε. Αγνοούμε με τη φαντασία μας τη βαρύτητα, οπότε «διακρίνουμε» την πρώτη κίνηση. Είναι μια ευθύγραμμη ομαλή με αρχική ταχύτητα υ_0.

Στη συνέχεια υποθέτουμε ότι δεν υπάρχει ταχύτητα υ_0, οπότε μπορούμε να «διακρίνουμε» τη δεύτερη κίνηση. Είναι μια ελεύθερη πτώση. Αν εφαρμόσουμε όσα είπαμε για την αρχή της ανεξαρτησίας, θα μπορέσουμε **να προβλέψουμε τη θέση της μπίλιας στο μέλλον.**

$$x = \upsilon_0 t$$

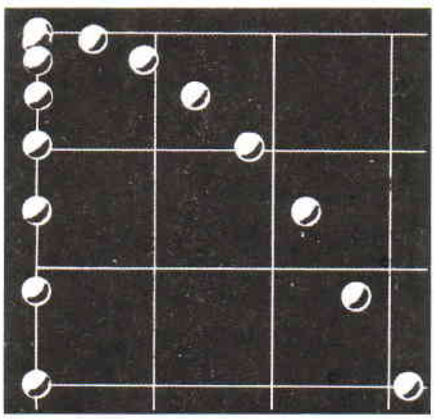
$$y = \frac{1}{2} g t^2$$

Εξισώσεις που μας δίνουν τη θέση του αντικειμένου σε κάθε χρονική στιγμή.

Θεωρούμε ως αρχή των χρόνων τη στιγμή που η μπίλια εγκαταλείπει το τραπέζι. Για να προβλέψουμε τη θέση της μετά από χρόνο **t**, τη φανταζόμαστε –σύμφωνα με όσα είπαμε– να κινείται με οριζόντια σταθερή ταχύτητα επί χρόνο **t**. Εντοπίζουμε, έτσι, ένα σημείο Α, στο οποίο θα φτάσει τη στιγμή **t**. Θα είναι ΟΑ = υ_0t. Από το Α τη φανταζόμαστε, στη συνέχεια, να πέφτει ελεύθερα επί τον ίδιο χρόνο **t**, οπότε φτάνει σε ένα σημείο Σ με ΑΣ = $\frac{1}{2} g t^2$. Η θέση αυτή Σ είναι η θέση, στην οποία πράγματι θα βρίσκεται μετά χρόνο t από τη στιγμή που εγκατέλειψε την άκρη του τραπεζιού. Είναι φανερό ότι με κατάλληλη επιλογή αξόνων οι συντεταγμένες θέσης (x,y) θα δίνονται από τις δύο εξισώσεις $\mathbf{x = \upsilon_0 t}$ και $\mathbf{y = \frac{1}{2} g t^2}$, οι οποίες αποτελούν τις εξισώσεις κίνησης. Με απαλοιφή των χρόνων προκύπτει και η λεγόμενη εξίσωση τροχιάς

$$y = \frac{g}{2\upsilon_0^2} x^2$$

η οποία συσχετίζει τις συντεταγμένες x και y κάθε σημείου της τροχιάς και, όπως μας λέει η μαθηματική ανάλυση, η τροχιά αυτή θα αντιστοιχεί στο γεωμετρικό σχήμα της παραβολής.



Στη χρονοφωτογραφία διακρίνεται η κίνηση δύο μικρών σφαιρών, που ξεκίνησαν ταυτόχρονα. Φαίνεται καθαρά ότι τα δύο σώματα βρίσκονται κάθε στιγμή στο ίδιο οριζόντιο επίπεδο.

Αξίζει να δώσουμε έμφαση στο ότι, κατά την πρόβλεψη της θέσης, δεχτήκαμε την ισότητα τριών χρόνων,

α. του χρόνου που θα έκανε η μπίλια να κινηθεί από το Ο μέχρι το Α,

β. του χρόνου που θα έκανε να πέσει από το Α στο Σ κατακόρυφα και

γ. του χρόνου που χρειάστηκε για να μετακινηθεί από το Ο στο Σ σε παραβολική τροχιά.

Το πιο σημαντικό, ίσως, απ' όλα είναι ότι διαθέτουμε μια τεχνική, που μας επιτρέπει να προβλέπουμε τις θέσεις της μπίλιας σε κάθε χρονική στιγμή.

Ερωτήσεις και προβλήματα

(Αν σε κάποιο πρόβλημα χρειαστείτε το μέτρο της βαρυτικής επιτάχυνσης να το θεωρήσετε γνωστό και ίσο με 10 m/s^2. Η αντίσταση του αέρα θα θεωρείται αμελητέα).



2.1. Πώς προσδιορίζεται το άθροισμα δύο διαδοχικών μετατοπίσεων; Δείξτε το με ένα σχήμα.

2.2. Τι λέγεται διάνυσμα; Ποια μεγέθη λέγονται διανυσματικά;

2.3. Ποια μεγέθη λέγονται μονόμετρα;

2.4. Ποια είναι η σχέση των εννοιών *θέση* και *μετατόπιση* σε μια ευθύγραμμη κίνηση;

2.5. Ποιες πληροφορίες μας δίνει η ταχύτητα ενός αντικειμένου α) με το μέτρο της; β) με την κατεύθυνσή της;

2.6. Σε τι αναφέρεται η έννοια *μέση ταχύτητα;* Πώς ορίζεται; Πώς μπορούμε να την μετρήσουμε;

2.7. Σε τι αναφέρεται η έννοια *ταχύτητα;* Πώς ορίζεται;

2.8. Δώστε τη συντομότερη απάντηση στο ερώτημα: «ποια κίνηση λέγεται ευθύγραμμη ομαλή;»

2.9. Η εξίσωση $x = υt$ μας δίνει τη θέση ενός αντικειμένου το οποίο κινείται ευθύγραμμα. Κάτω από ποιες προϋποθέσεις ισχύει η εξίσωση αυτή; Ποια είναι η μορφή της αντίστοιχης γραφικής παράστασης;

2.10. Πώς ορίζεται η έννοια *επιτάχυνση;* Ποια είναι η μονάδα μέτρησης του μεγέθους;

2.11. Πότε μια ευθύγραμμη κίνηση θεωρείται ομαλά επιταχυνόμενη; Ποιες είναι οι προϋποθέσεις ώστε η εξίσωση $υ=αt$ να μας δίνει την ταχύτητα (υ) του αντικειμένου σε κάθε χρονική στιγμή;

2.12. Ποια είναι η μορφή της γραφικής παράστασης ταχύτητας χρόνου
α) κατά την ευθύγραμμη ομαλή κίνηση ενός αντικειμένου;
β) κατά την ευθύγραμμη ομαλά επιταχυνόμενη κίνηση ενός αντικειμένου του οποίου η ταχύτητα κατά την αρχή των χρόνων είναι μηδέν;

2.13. Σύμφωνα με την Αριστοτελική φυσική
α) Κατά την πτώση ενός στερεού σώματος, σύντομα αυτό αποκτά μία σταθερή ταχύτητα.
β) Κατά την πτώση στο κενό η ταχύτητα ενός σώματος είναι ανάλογη προς τον χρόνο της πτώσης.
γ) Ένα αντικείμενο πιο βαρύ από ένα άλλο περιέχει μεγαλύτερη ποσότητα από το στοιχείο Γη και παρουσιάζει πιο έντονα την τάση να κινηθεί προς τη φυσική του θέση.
Με ποιά από αυτά συμφωνείτε;

2.14. Πώς περιγράφει η Αριστοτελική φυσική την πτώση ενός αντικειμένου; Πώς απαντά στο ερώτημα: «από τι εξαρτάται η τελική ταχύτητα των αντικειμένων»;

2.15. Ποια εμπόδια συνάντησε ο Γαλιλαί-

ος μέχρι να φθάσει στο νόμο της ελεύθερης πτώσης; Πώς το αντιμετώπισε;

2.16. Για να οδηγηθεί ο Γαλιλαίος στο νόμο της ελεύθερης πτώσης
α) Χρησιμοποίησε ένα σωλήνα κενού.
β) Χρησιμοποίησε ένα κεκλιμένο επίπεδο πιστεύοντας ότι ο χαρακτήρας της κίνησης μιας σφαίρας που κυλάει πάνω του είναι ίδιος με εκείνον της σφαίρας που πέφτει ελεύθερα.
γ) Χρησιμοποίησε ένα κεκλιμένο επίπεδο πιστεύοντας ότι έτσι περιοριζόταν η παρέμβαση του αέρα στην κίνηση.
δ) Χρησιμοποίησε ένα κεκλιμένο επίπεδο διότι αυτό του έδινε τη δυνατότητα για χρονομετρήσεις ελεγχόμενες.
Με ποιο από αυτά διαφωνείτε;

2.17. Τι πιστεύουμε σήμερα ότι ισχύει κατά την ελεύθερη πτώση;

2.18. Πώς διαφοροποιείται η τιμή της βαρυτικής επιτάχυνσης σε σχέση με το γεωγραφικό πλάτος;

2.19. Τι ρόλο παίζει η κεντρομόλος επιτάχυνση; Πότε μία κυκλική κίνηση λέγεται ομαλή;

2.20. Τι εννοούμε λέγοντας ότι η ομαλή κυκλική κίνηση είναι επιταχυνόμενη;

2.21. Γιατί η ομαλή κυκλική κίνηση είναι περιοδική; Πώς ορίζονται οι έννοιες περίοδος και συχνότητα στην περίπτωση αυτή;

2.22. Κατά την ομαλή κυκλική κίνηση η ταχύτητα έχει μέτρο ίσο με το (οποιοδήποτε) πηλίκο διαγραφόμενου τόξου σε ορισμένο χρόνο προς τον χρόνο αυτό. Πώς μπορούμε, βασιζόμενοι σ' αυτό, να αποδείξουμε τη σχέση $\upsilon = 2\pi R/T$ η οποία συνδέει το μέτρο της ταχύτητας με την περίοδο της κυκλικής κίνησης και με την ακτίνα της τροχιάς;

2.23. Πώς διατυπώνεται η αρχή ανεξαρτησίας των κινήσεων; Πώς προσδιορίζεται βάσει αυτής, η θέση ενός κινητού το οποίο συμμετέχει σε δύο κινήσεις;

2.24. Πώς μπορούμε να προβλέψουμε τις μελλοντικές θέσεις ενός αντικειμένου που εκτοξεύεται οριζόντια; Ποιες είναι οι αντίστοιχες εξισώσεις που μας δίνουν τη θέση του;



Να αναρωτηθούμε...

2.25. Η φράση *«μια κίνηση δεν μπορεί να περιγραφεί παρά μόνο σε σχέση με κάποιο σύστημα αναφοράς»* σημαίνει ότι η ίδια κίνηση ως προς δύο διαφορετικά συστήματα αναφοράς:
α) περιγράφεται με άλλες εξισώσεις (Σωστό ή Λάθος;)
β) εμφανίζεται με δύο διαφορετικές τροχιές (Σωστό ή Λάθος;)

2.26. Λένε ότι ο Einstein ταξιδεύοντας κάποτε με το τρένο ρώτησε: «Σταματάει σ' αυτό το τρένο η πόλη Crewe;» Έχει νόημα μια τέτοια ερώτηση; Δικαιολογήστε την απάντηση.

2.27. Γιατί δεν μπορούν να συνεννοηθούν; Δώστε κάποια εξήγηση.



2.28. Ένα πορτοκαλί λαμπάκι είναι στερεωμένο στη ζάντα ενός ποδηλάτου.

Δύο παρατηρητές αντιλαμβάνονται με διαφορετικό τρόπο την τροχιά του. Ο ένας υποστηρίζει ότι καθώς τρέχει το ποδήλατο η τροχιά που διαγράφει το λαμπάκι είναι κυκλική, ενώ ο άλλος διακρίνει ότι η τροχιά του ίδιου αντικειμένου δεν είναι κυκλική. Ποιος έχει δίκιο; Δικαιολογήστε την απάντηση. Ένας τρίτος σκέφτεται ότι, αν ήταν έντομο με νοημοσύνη και βρισκόταν σε συγκεκριμένη θέση, θα διαπίστωνε ότι δεν υπάρχει τροχιά. Έχει δίκιο; Γιατί;

2.29. Δύο ομοειδή φυσικά μεγέθη, μέτρων 6 και 8 μονάδων αντίστοιχα, προστιθέμενα δίνουν μέγεθος μέτρου 14 μονάδων. Τα δύο αυτά μεγέθη θα μπορούσε να είναι:
α) χρονικές διάρκειες
β) μάζες
γ) μετατοπίσεις διαφορετικών κατευθύνσεων
δ) μετατοπίσεις ίδιων κατευθύνσεων.
Με ποια από αυτά συμφωνείτε;

2.30. Περιγράφουμε την ευθύγραμμη κίνηση ενός αντικειμένου χρησιμοποιώντας άξονα ο οποίος συμπίπτει με την τροχιά. Κατά τις χρονικές στιγμές t_1, t_2 και t_3 οι αντίστοιχες θέσεις του αντικειμένου ήταν +30 cm, +42 cm και +33 cm. Προσδιορίστε τις μετατοπίσεις του αντικειμένου κατά τη χρονική διάρκεια α) από t_1, ως t_2 β) από t_2 ως t_3 και γ) από t_1 ως t_3.

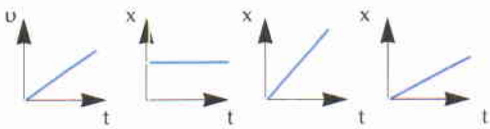
2.31. Σε τι διαφέρει η έννοια *ταχύτητα* την οποία χρησιμοποιεί η φυσική από την ομώνυμη έννοια που χρησιμοποιούμε στην καθημερινή μας ζωή;

2.32. Είναι δυνατόν ένα αντικείμενο να έχει ταχύτητα 800 km/h και ταυτοχρόνως το ίδιο αντικείμενο να έχει ταχύτητα μηδέν; Σε περίπτωση καταφατικής απάντησης δώστε ένα παράδειγμα.

2.33. Ποια ερώτηση πρέπει να μας κάνουν για να δώσουμε την απάντηση
α) ρυθμός μεταβολής της θέσης
β) ρυθμός μεταβολής της ταχύτητας

2.34. Η ταχύτητα διαφέρει από την επιτάχυνση κατά το ότι
α) η μία εκφράζει το «πόσο γρήγορα αλλάζει η θέση» ενός αντικειμένου ενώ η άλλη το «πόσο γρήγορα αλλάζει η ταχύτητά του»
β) η μία είναι μέγεθος διανυσματικό ενώ η άλλη μονόμετρο
γ) έχουν πάντοτε διαφορετικές κατευθύνσεις.
Με ποιο από αυτά συμφωνείτε;

2.35. Τα παρακάτω διαγράμματα αναφέρονται σε αντικείμενο που βρίσκεται διαρκώς πάνω στην ίδια ευθεία. Το x παριστάνει τη θέση του, το υ την ταχύτητά του και το t τη χρονική στιγμή.
Σε τι αναφέρεται καθένα από αυτά;



2.36. Οι παρακάτω σχέσεις αναφέρονται στην κίνηση ενός αντικειμένου που βρίσκεται διαρκώς πάνω στην ίδια ευθεία. Το x παριστάνει τη θέση του, το υ την ταχύτητά του και το t τη χρονική στιγμή.
α) $x = 70 + 4t$ β) $υ = 2t$ γ) $υ = 20 - 3t$ δ) $x = 4t + 2t^2$
Σε τι αναφέρεται κάθε μια από αυτές;

2.37. Κατά την ευθύγραμμη ομαλή κίνηση:
α) Οι μετατοπίσεις είναι ανάλογες προς τους χρόνους
β) Ισχύει $x = ½\, at^2$ όπου x η θέση και α η επιτάχυνση του αντικειμένου

γ) Η ταχύτητα διατηρείται σταθερή
δ) Η επιτάχυνση δεν είναι ίση με μηδέν.
Με ποια από αυτά διαφωνείτε; Γιατί διαφωνείτε;

2.38. Κατά την ευθύγραμμη ομαλά επιταχυνόμενη κίνηση ($υ_0 = 0$)
α) Οι μετατοπίσεις είναι ανάλογες προς τους χρόνους
β) Η ταχύτητα διαρκώς μεταβάλλεται
γ) Ο ρυθμός μεταβολής της ταχύτητας είναι σταθερός
δ) Η επιτάχυνση έχει σταθερό μέτρο αλλά μεταβαλλόμενη κατεύθυνση
ε) Ισχύει $υ = αt$ όπου υ η ταχύτητα και α η επιτάχυνση
Με ποια από αυτά συμφωνείτε; Δικαιολογήστε την απάντηση.

2.39. Σ' ένα διήγημα επιστημονικής φαντασίας είναι χειμώνας, χιονίζει και ο Αριστοτέλης με το Γαλιλαίο συζητούν χωρίς να τσακώνονται. Παρατηρούν την πτώση μιας νιφάδας χιονιού και επιχειρούν να απαντήσουν στο «γιατί πέφτει πιο αργά από ένα βαρύ βότσαλο». Σας ζητούμε να γράψετε ένα μικρό διάλογο.

2.40. Ελεύθερη πτώση είναι
α) η πτώση ενός αλεξιπτωτιστή
β) μια κίνηση που γίνεται στο κενό
γ) η πτώση ενός αντικειμένου το οποίο αφήνει από τα χέρια του ένας αστροναύτης πάνω από την επιφάνεια του φεγγαριού
Με ποια από αυτά συμφωνείτε;

2.41. Κατά την ελεύθερη πτώση
α) Ένα βαρύ αντικείμενο πέφτει ταυτόχρονα με ένα πολύ πιο βαρύ
β) Η θέση κάθε αντικειμένου δίνεται από την εξίσωση $y = ½\ gt$
γ) Η ταχύτητα κάθε αντικειμένου δίνεται από την εξίσωση $υ = gt$
Με ποια από αυτά συμφωνείτε;

2.43. Κατά τη διάρκεια μιας ομαλής κυκλικής κίνησης τι είναι αυτό που δεν μεγαλώνει, δεν μικραίνει αλλά διαρκώς αλλάζει; Δικαιολογήστε την απάντηση.

2.44. Σε τι διαφέρει η έννοια *επιτάχυνση* την οποία χρησιμοποιεί η φυσική από την ομώνυμη έννοια που χρησιμοποιούμε στην καθημερινή ζωή;

2.45. Για να γράψουμε το κεφάλαιο Α πρέπει η μύτη του μαρκαδόρου να έχει επιτάχυνση; Για ποια από τα κεφαλαία γράμματα του αλφαβήτου απαιτείται η «μύτη» να έχει οπωσδήποτε κεντρομόλο επιτάχυνση; Δικαιολογήστε τις δύο απαντήσεις.

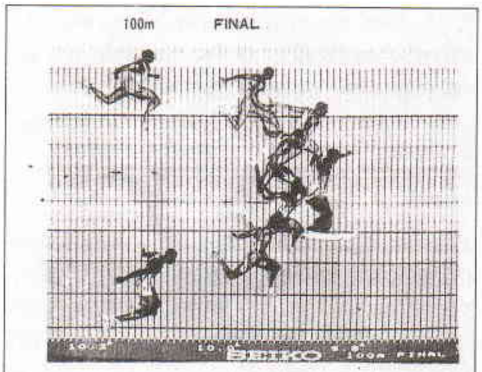
2.46. Από τις παρακάτω λέξεις και εξισώσεις να διαλέξετε τις κατάλληλες για να γεμίσουν τα κενά του κειμένου:

ΕΠΙΤΑΧΥΝΟΜΕΝΗ	ΜΕΤΑΒΑΛΛΕΤΑΙ	ΠΕΡΙΟΔΙΚΗ	ΚΕΝΤΡΟΜΟΛΟΣ
ΔΙΑΤΗΡΕΙΤΑΙ	ΤΟ ΜΕΤΡΟ	ΑΛΛΑΖΕΙ	ΠΕΡΙΟΔΟΣ
ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ	Η ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ	ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΗ	$υ = 2πR / T$
ΤΑΧΥΤΗΤΑ	ΟΜΑΛΗ	$υ = πR^2 / T$	$υ^2 = α_K R$

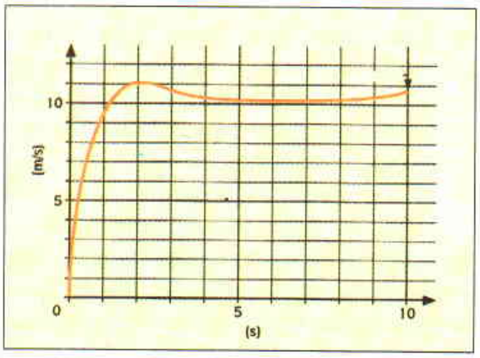
Κατά την .... κυκλική κίνηση ενός σημειακού αντικειμένου η ταχύτητα .... Αλλάζει συνεχώς .... της, ενώ .... της διατηρείται. Υπάρχει .... η οποία χαρακτηρίζεται .... καθώς το σχετικό διάνυσμα κατευθύνεται συνεχώς προς το κέντρο της τροχιάς. Η κίνηση είναι ...., αλλά είναι και .... καθώς το κινητό ανά ίσα χρονικά διαστήματα ξαναβρίσκεται στη θέση του ανακτώντας την .... του και την επιτάχυνσή του. Η .... σ' αυτήν την περίπτωση ορίζεται ως χρόνος απαιτούμενος για να διαγραφεί μια περιφέρεια. Εύκολα αποδεικνύεται ότι η σχέση της ταχύτητας με την περίοδο και με την ακτίνα της τροχιάς είναι η ...., ενώ πιο δύσκολα αποδεικνύεται ότι η σχέση της ταχύτητας με την επιτάχυνση και με την ακτίνα είναι ....

2.47. Πώς μπορούμε, βασιζόμενοι στην αρχή ανεξαρτησίας των κινήσεων να προβλέψουμε τις μελλοντικές θέσεις ενός αντικειμένου το οποίο εκτοξεύεται i) κατακόρυφα προς τα κάτω ii) κατακόρυφα προς τα πάνω; iii) οριζόντια; Πως μπορούμε να προβλέψουμε την ταχύτητα ενός αντικειμένου το οποίο εκτοξεύεται i) οριζόντια ii) κατακόρυφα προς τα κάτω iii) κατακόρυφα προς τα πάνω;

2.48. Στο διάγραμμα παριστάνεται η χρονική εξέλιξη της ταχύτητας ενός δρομέα των 100 μέτρων. Τέτοια διαγράμματα είναι πολύ χρήσιμα στους προπονητές.



100 m 9.98 s



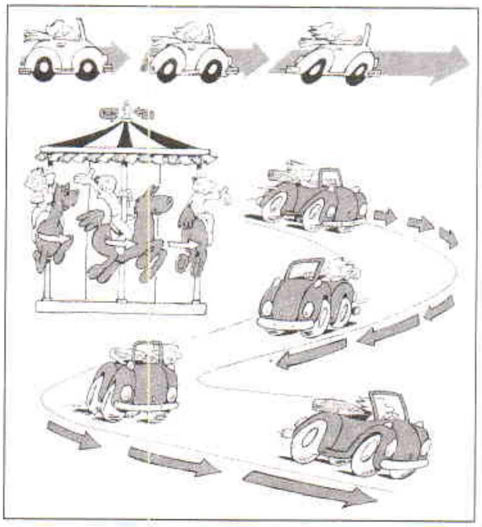
Σας ζητούμε με βάση το διάγραμμα, να προσδιορίσετε

α) τη χρονική στιγμή που παρουσίασε τη μεγαλύτερη ταχύτητα

β) μετά από ποια χρονική στιγμή η κίνηση μπορεί να θεωρηθεί ομαλή

γ) σε ποιο από τα δευτερόλεπτα της κίνησης παρουσίασε τη μεγαλύτερη μεταβολή ταχύτητας.

2.49. Στην πρώτη από τις κινήσεις τα βελάκια παριστάνουν την ταχύτητα. Και στις τρεις αυτές κινήσεις υπάρχει επιτάχυνση;



Σε ποια δεν υπάρχει κεντρομόλος επιτάχυνση; Δικαιολογήστε τις απαντήσεις.

Να λύσουμε προβλήματα

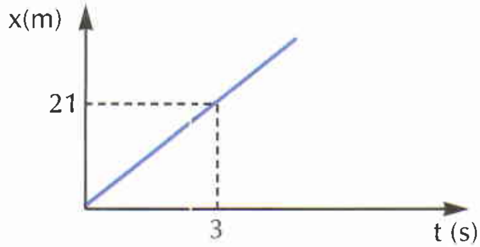


2.50. Ένας στρατιώτης βαδίζει 100 μέτρα Βόρεια, μετά 100 μέτρα Δυτικά και τέλος 100 μέτρα Νότια.
α) Πόση είναι η συνολική απόσταση που κάλυψε;
β) Πόση είναι η μετατόπισή του;

2.51. Ο μοτοσικλετιστής προσπερνά το γιωταχί στο ύψος μιας κολώνας της ΔΕΗ ακριβώς στις 09.20. Οι δύο κινήσεις γίνονται με σταθερές ταχύτητες, 30 m/s ο μοτοσικλετιστής, 23 m/s το αυτοκίνητο.
Που θα βρίσκεται ο μοτοσικλετιστής στις 9.20.05;
Πόσο θα απέχουν, κατά τη στιγμή εκείνη, τα δύο οχήματα;

2.52. Στις 12.15 ακριβώς το μπροστινό τμήμα της αμαξοστοιχίας φθάνει στην άκρη του τούνελ το οποίο διασχίζει με σταθερή ταχύτητα 20 m/s. Το μήκος της αμαξοστοιχίας είναι 200 μέτρα και το μήκος του τούνελ 800 μέτρα.
α) Που θα βρίσκεται η αμαξοστοιχία
i) στις 12.15.08; ii) στις 12.15.20; iii) στις 12.15.40;
β) Πόση ώρα θα βρίσκεται ολόκληρη μέσα στο τούνελ;

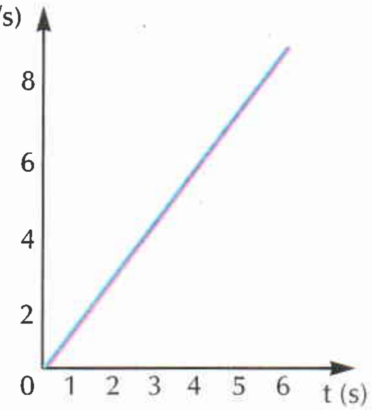
2.53. Υποθέτουμε ότι μία καρδερίνα πετάει οριζόντια ευθύγραμμα και σε χαμηλό σχετικά ύψος. Σε κάποια χρονική στιγμή περνάει δίπλα από κάποιο κλαδί. Η χρονική αυτή στιγμή θεωρείται ως αρχή των χρόνων στο διάγραμμα θέσης-χρόνου που περιγράφει την κίνησή της.
α) Ποιο είναι το είδος της κίνησής της;
β) Πού θα βρίσκεται τέσσερα δευτερόλεπτα αργότερα; Πόση είναι η ταχύτητά της;



2.54. Δύο πεζοπόροι βασίζουν στον ίδιο δρόμο με σταθερές ταχύτητες και προς την ίδια κατεύθυνση. Ο προπορευόμενος έχει ταχύτητα 1,2 m/s και σε κάποια χρονική στιγμή περνάει μπροστά από μία ακακία. Την ίδια στιγμή ο άλλος, κινούμενος με ταχύτητα 1 m/s, βρίσκεται 20 μέτρα πίσω.
Που θα βρίσκεται ο προπορευόμενος όταν ο δεύτερος φθάσει στο ύψος της ακακίας; Που θα βρίσκεται 12 δευτερόλεπτα αργότερα;

2.55. Ένα αντικείμενο κινείται ευθύγραμμα με σταθερή επιτάχυνση 3 m/s^2. Κατά τη χρονική στιγμή που θεωρείται ως αρχή των χρόνων το αντικείμενο βρίσκεται στην εκκίνηση σε κάποιο σημείο Ο. Θεωρώντας το Ο ως αρχή των αξόνων σας ζητούμε:
α) να προβλέψετε το «που θα βρίσκεται» το κινητό μετά από τρία δευτερόλεπτα,
β) να υπολογίσετε την ταχύτητα του κατά τη χρονική στιγμή 2s,
γ) να κάνετε τη γραφική παράσταση $x = f(t^2)$ όπου x η θέση του και t η χρονική στιγμή για τα 7 πρώτα δευτερόλεπτα της κίνησής του.

2.56. Η ευθύγραμμη κίνηση ενός σημειακού αντικειμένου περιγράφεται με το διάγραμμα ταχύτητας-χρόνου που παρουσιάζεται παρακάτω,



α) Τι είδους κίνηση είναι αυτή;

β) Ποια είναι η επιτάχυνση του σημειακού αντικειμένου

– τη χρονική στιγμή 3 s;

– τη χρονική στιγμή 5 s;

γ) Που θα βρίσκεται το σημειακό αντικείμενο κατά τη χρονική στιγμή 4 s, αν στην αρχή των χρόνων βρισκόταν σε κάποιο σημείο Ο;

δ) Πόση είναι η μετατόπισή του κατά τα πρώτα 6 δευτερόλεπτα της κίνησης;

2.57. Ο νεαρός με το μηχανάκι κινείται με σταθερή ταχύτητα 20 m/s. Τη στιγμή που περνάει μπροστά από το περίπτερο το περιπολικό βάζει μπρος και αρχίζει να τον κυνηγάει με σταθερή επιτάχυνση 2 m/s^2.

α) Σε ποια στιγμή το περιπολικό και το μηχανάκι έχουν ίσες ταχύτητες; Πόσο θα απέχουν κατά τη στιγμή αυτή; Πόσο θα απέχουν 8 δευτερόλεπτα μετά από τη στιγμή που ξεκίνησε το περιπολικό;

β) Πότε το περιπολικό θα φθάσει τον μοτοσικλετιστή;

2.58. Μια μοτοσικλέτα πιάνει τα 100 km/h σε 7,5 s. Θεωρώντας την επιτάχυνσή της σταθερή σας ζητάμε:

α) να υπολογίσετε την τιμή της επιτάχυνσης

β) να υπολογίσετε την ταχύτητά της 5 δευτερόλεπτα μετά την εκκίνηση

γ) χρησιμοποιώντας χαρτί μιλιμετρέ να κάνετε τη γραφική παράσταση ταχύτητας - χρόνου για τα 6 πρώτα δευτερόλεπτα της κίνησης.

2.59. Βασιζόμενοι στα δεδομένα του πίνακα (x,t)

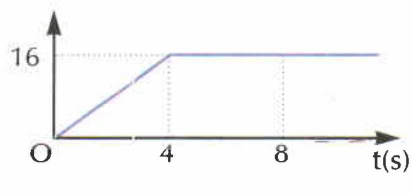
t (s)	0	1	2	3	4	5	6	7
x (m)	0	3	12	27	48	75	108	147

α) να δείξετε ότι η κίνηση είναι ομαλά επιταχυνόμενη και

β) να υπολογίσετε την επιτάχυνση του κινητού.

2.60. Ο χρόνος αντίδρασης ενός οδηγού είναι 0,4 s. Αν η επιβράδυνση του αυτοκινήτου είναι 5 m/s^2, προσπαθήστε να προβλέψετε εάν θα αποφύγει τη σύγκρουση με ένα ακίνητο εμπόδιο. Τη στιγμή που το είδε απείχε από αυτό 50 μέτρα και η ταχύτητά του ήταν 72 km/h.

2.61. Η ευθύγραμμη κίνηση ενός αντικειμένου περιγράφεται με το παρακάτω διάγραμμα ταχύτητας-χρόνου.



Σας ζητάμε να υπολογίσετε:

α) την επιτάχυνση του κατά τις χρονικές στιγμές 1s, 2s, 3s, 6s, 7s και

β) την μετατόπιση του κινητού κατά τη διάρκεια των 8 πρώτων δευτερολέ-

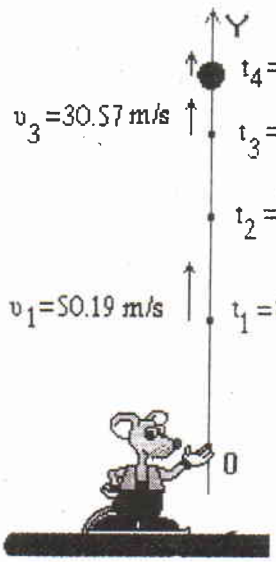
πτων της κίνησης,

2.62. Από την κορυφή ενός ουρανοξύστη αφήνεται ένα αντικείμενο και φθάνει στο έδαφος μετά από 3 δευτερόλεπτα. Πόσο ύψος έχει ο ουρανοξύστης;

2.63. Από ένα σημείο του Πύργου της Πίζας σε ύψος 120 μέτρων αφήνεται ένα αντικείμενο. Πότε φθάνει στο έδαφος; Με ποια ταχύτητα;

2.64. Η πρώτη πέτρα αφήνεται από το χείλος του γκρεμού στις 12.00 ακριβώς. Ύστερα από μισό δευτερόλεπτο, από το ίδιο σημείο, αφήνεται η δεύτερη. Που θα βρίσκονται δύο δευτερόλεπτα μετά τις 12.00; Πόσο θα απέχουν; Ποια ταχύτητα θα έχει η μία και ποια η άλλη κατά τη στιγμή εκείνη;

2.65. Σε ένα πρόγραμμα προσομοίωσης με υπολογιστή, το ποντίκι εκτοξεύει τη μικρή σφαίρα κατακόρυφα προς τα πάνω. Στο σχήμα δίνονται τα μέτρα της ταχύτητας της σφαίρας τις χρονικές στιγμές $t_1 = 1$ s και $t_3 = 3$ s. Θεωρήστε ότι η κίνηση είναι ομαλά επιταχυνόμενη με αρχική ταχύτητα.



Υπολογίστε:

α) τη μεταβολή της ταχύτητας για τη χρονική διάρκεια (t_1, t_3).

β) την επιτάχυνση της βαρύτητας.

γ) το μέτρο της αρχικής ταχύτητας;

δ) την ταχύτητα τη χρονική στιγμή $t_4 = 4$ s.

ε) σε πόσο χρόνο η σφαίρα θα επανέλθει στο χέρι του ποντικιού;

2.66. Μια μουσική φράση η οποία διαρκείας 10 δευτερόλεπτα εγγράφεται σε δίσκο 33 στροφών και σε μέση ακτίνα 14 εκατοστών.
Πόσο είναι το μήκος του τόξου που καλύπτει η εγγραφή της μουσικής φράσης;

2.67. Ένα σημειακό αντικείμενο σε κυκλική κίνηση χρειάζεται 20 δευτερόλεπτα για κάθε πλήρη περιστροφή. Η περιφέρεια του κύκλου είναι 60 μέτρα. α) Πόση είναι η συχνότητα της περιοδικής αυτής κίνησης; β) Πόση είναι η ταχύτητα του σημειακού αντικειμένου;

2.68. Ένας δίσκος 33 στροφών τοποθετείται πάνω στην πλάκα του πικάπ και αρχίζει να παίζει. Βάζουμε πάνω στο δίσκο ένα μικρό χαρτάκι Μ σε απόσταση 14 εκατοστά από τον άξονα περιστροφής.

α) Υπολογίστε το μέτρο της ταχύτητας του Μ σε m/s.

β) Πόση απόσταση διανύει το χαρτάκι σε χρόνο 12 δευτερολέπτων;

2.69. Ένα αυτοκίνητο παίρνει τη στροφή με 72 km/h. Πόση είναι η κεντρομόλος επιτάχυνση αν η στροφή είναι τόξο ακτίνας 40 μέτρων; Πόση κεντρομόλος επιτάχυνση απαιτείται ώστε να πάρει την ίδια στροφή με διπλάσια ταχύτητα; Το αυτοκίνητο να θεωρηθεί σημειακό αντικείμενο.

2.70. Ένα σημειακό αντικείμενο σε κυκλική κίνηση ακτίνας 40 εκατοστών

χρειάζεται 6 δευτερόλεπτα για κάθε πλήρη περιφορά.
Πόσο είναι το μέτρο της ταχύτητάς του;
Κατά τη διάρκεια αυτής της κίνησης η ταχύτητα ούτε μεγαλώνει ούτε μικραίνει αλλά μεταβάλλεται. Τι σημαίνει αυτό;
Πόσο είναι το μέτρο της μεταβολής της ταχύτητας σε 3 δευτερόλεπτα;
Πόση είναι η μεταβολή του μέτρου της ταχύτητας στον ίδιο χρόνο;

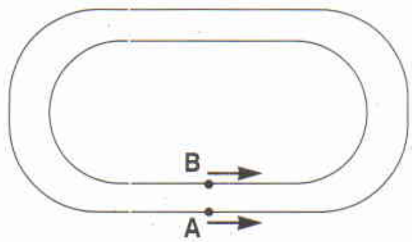
2.71. Η μονάδα μέτρο μήκους ορίστηκε ως το 1:10 000 000 της απόστασης του Βόρειου Πόλου από τον Ισημερινό. Η μονάδα 1 δευτερόλεπτο ορίστηκε ως το 1: 86 400 της διάρκειας της ημερήσιας περιστροφής της Γης. Βασιζόμενοι στους δύο αυτούς ορισμούς σας ζητάμε να υπολογίσετε την ταχύτητα.
α) ενός ιθαγενούς ο οποίος κοιμάται σε μία περιοχή της ζούγκλας του Αμαζονίου πάνω ακριβώς στον Ισημερινό,
β) ενός πιγκουίνου που βρίσκεται πάνω ακριβώς στον Βόρειο Πόλο. Ως σύστημα αναφοράς να θεωρήσετε ένα σύστημα συνδεδεμένο με το κέντρο της (σφαιρικής) Γης.

2.72. Ο Γιούρι Γκαγκάριν ήταν ο πρώτος άνθρωπος που έκανε ένα ταξίδι στο διάστημα. Τον Απρίλιο του 1961 μέσα σε ειδικό σκάφος διέγραψε μια πλήρη τροχιά γύρω από τη Γη σε 89 λεπτά της ώρας. Σας ζητούμε, θεωρώντας την τροχιά του κυκλική σε «ύψος» 240 χιλιομέτρων,
α) να υπολογίσετε την ταχύτητα του σκάφους και να τη συγκρίνετε με την ταχύτητα ενός αγωνιστικού οχήματος,
β) να υπολογίσετε την κεντρομόλο επιτάχυνση του σκάφους και να την συγκρίνετε με την επιτάχυνση της βαρύτητας ($9{,}81\ m/s^2$). Η ακτίνα της Γης είναι 6.370 χιλιόμετρα. (Να χρησιμοποιήσετε κομπιουτεράκι).

2.73. Η Σελήνη ως δορυφόρος της Γης κάνει μια πλήρη περιφορά σε 27,33 ημέρες.
α) Πόση είναι η ταχύτητά της ως προς το κέντρο της Γης;
β) Πόσο μετακινείται σε ένα δευτερόλεπτο; Πάνω από ένα χιλιόμετρο;
γ) Πόση είναι η κεντρομόλος επιτάχυνσή της κατά την περιφορά της; Πόσες φορές είναι μικρότερη από την επιτάχυνση της βαρύτητας;
Την κίνηση της Σελήνης γύρω από τη Γη να τη θεωρήσετε κυκλική κίνηση σημειακού αντικειμένου. Η απόσταση του κέντρου της Σελήνης από το κέντρο της Γης είναι 60 φορές μεγαλύτερη από την ακτίνα της Γης η οποία είναι 6370 km. (Να χρησιμοποιήσετε κομπιουτεράκι).

2.74. Ο δευτερολεπτοδείκτης ενός ρολογιού έχει μήκος 20 εκατοστά. Σας ζητούμε να υπολογίσετε
α) το μέτρο της ταχύτητας του άκρου του
β) το μέτρο της (διανυσματικής) μεταβολής της ταχύτητας μέσα σε 15 δευτερόλεπτα

2.75. Δύο δρομείς ξεκινούν ταυτόχρονα από τα σημεία Α και Β του σταδίου και πραγματοποιούν ένα γύρο σε τροχιές σαν κι αυτές που παριστάνονται στο σχήμα. Η απόσταση ΑΒ είναι 6 m και οι ταχύτητές τους έχουν σταθερό μέτρο 8 m/s.



Ο χρόνος που χρειάζεται ο ένας δρομέας για να κάνει ένα γύρο είναι μεγαλύτερος από τον χρόνο που χρειάζεται ο άλλος. Ποια είναι η διαφορά των δύο

χρόνων; Το σχήμα σε κάθε στροφή να θεωρηθεί ημιπεριφέρεια.

2.76. Κάποιος αφήνει, από ένα ορισμένο σημείο Α, ένα βαρύ αντικείμενο να πέσει κατακόρυφα, ενώ την ίδια στιγμή ένα άλλο βαρύ αντικείμενο εκτοξεύεται από το ίδιο σημείο (Α) με οριζόντια ταχύτητα 2 m/s. Πόσο θα απέχουν τα δύο αντικείμενα μετά από i) 0,1 s ii) 0,3 s iii) 0,5 s; Το Α βρίσκεται σε ύψος 2 μέτρων από το έδαφος.

2.77. Κάποιος εκσφενδονίζει ένα βότσαλο από την παραλία προς τη θάλασσα. Η βολή γίνεται από ύψος 80 cm με οριζόντια ταχύτητα 12 m/s. Πού θα βρίσκεται το βότσαλο 0,2 δευτερόλεπτα μετά τη στιγμή που εκσφενδονίστηκε; Ποια ταχύτητα θα έχει τη στιγμή που θα συναντήσει το νερό;

2.78. Η ταχύτητα του ρεύματος ενός ποταμού είναι 1 m/s και το πλάτος του ποταμού 210 m. Ένα πλοιάριο αναχωρεί σε κάποια στιγμή από τη μία όχθη για να πάει απέναντι.
Η «ιδία» ταχύτητά του, εκείνη δηλαδή που θα ανέπτυσσε αν δεν υπήρχε ρεύμα (σε μια λίμνη για παράδειγμα), έχει κατεύθυνση κάθετη στο ρεύμα και μέτρο 10,8 km/h.
Πόσος χρόνος θα χρειαστεί για να φτάσει απέναντι; Ποια θα είναι η κατεύθυνση της κίνησής του;

Απόσπασμα από το βιβλίο *Η Επιστήμη του Χάους*
του Ian Stewart

Για τους φοιτητές στο Πανεπιστήμιο της Pisa, στα 1580, η ζωή πρέπει να κυλούσε συναρπαστικά, γιατί ήταν μια περίοδος δραματικής προόδου για την ανθρώπινη γνώση. Αλλά ο ενθουσιασμός δεν μπορεί να συνεχίζεται σε κάθε στιγμή. Στη διάρκεια μιας εκκλησιαστικής λειτουργίας, ένας φοιτητής πρέπει να βαρέθηκε, κι άρχισε να παρακολουθεί ένα μεγάλο πολυέλαιο που ταλαντευόταν απ' το αεράκι. Ταλαντευόταν ακανόνιστα, αλλά ο φοιτητής παρατήρησε ότι όταν ο πολυέλαιος έκανε μια πλατιά αιώρηση η ταχύτητά του αυξανόταν, ώστε ο χρόνος της μιας αιώρησής του να παραμένει σταθερός. Ρολόγια ακριβείας δεν είχαν ακόμα εφευρεθεί, έτσι χρονομέτρησε τον πολυέλαιο χρησιμοποιώντας τον σφυγμό του.

Ο φοιτητής ήταν ο Γαλιλαίος (Galileo Galilei), που μπήκε στο Πανεπιστήμιο σε ηλικία δεκαεφτά χρονών.

Ο Γαλιλαίος συνειδητοποίησε ότι οι έρευνες πάνω στη σκοπιμότητα των πραγμάτων δεν προσφέρουν στην ανθρωπότητα κάποιον έλεγχο πάνω στα φυσικά φαινόμενα. Αντί λοιπόν ν' αναρωτιέται γιατί πέφτει η πέτρα, αναρωτήθηκε για έναν ακριβή προσδιορισμό του πώς πέφτει. Αντί για την κίνηση της Σελήνης, που δεν μπορούσε να επηρεάσει ή να ρυθμίσει, μελέτησε σφαίρες που κυλούσαν σε επικλινείς επιφάνειες. Και σε μια έκρηξη ευφυΐας, επικέντρωσε την προσοχή του σε λίγα μεγέθη-κλειδιά: χρόνος, απόσταση, ταχύτητα, επιτάχυνση, ορμή, μάζα, αδράνεια. Σε μια εποχή που αναζητούσε την ουσία και την ποιότητα, με την επιλογή του ο Γαλιλαίος έδειξε μιαν αξιοθαύμαστη κατανόηση των βασικών μεγεθών, ιδιαίτερα όταν πολλές από τις μεταβλητές που επέλεξε δεν ήταν ποσοτικά άμεσα μετρήσιμες.

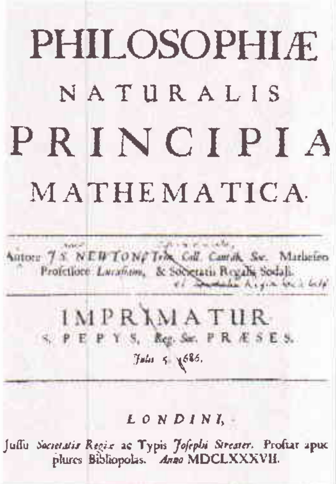
Ο χρόνος, συγκεκριμένα, στοίχισε στο Γαλιλαίο πολύ πονοκέφαλο. Δεν μπορείς να χρονομετρήσεις μια πέτρα που πέφτει, παρακολουθώντας την μεταβολή του ύψους ενός κεριού που καίγεται. Χρησιμοποίησε ρολόγια νερού και τον ίδιο του το σφυγμό, και όπως υπέθεσε ο Στίλλμαν Ντρέικ (Stilman Drake) ίσως να μουρμούριζε μελωδίες, διαιρώντας το χρόνο όπως ένας μουσικός. Για να επιβραδύνει δυναμικά φαινόμενα και να βελτιώσει την ακρίβεια των χρονομετρήσεών του, μελέτησε μια μπάλα που κυλούσε πάνω σε μια ελαφριά επικλινή επιφάνεια, κι όχι μια μπάλα σ' ελεύθερη πτώση. Και, με μια ανάμειξη φανταστικών και πραγματικών πειραμάτων κατέληξε σε έναν ακριβή προσδιορισμό του πώς πέφτουν τα σώματα εξαιτίας της βαρύτητας.

Σύμφωνα προς το πνεύμα της αρχαίας Ελληνικής γεωμετρίας –κατά το οποίο όλα τα αντικείμενα εξιδανικεύονται, έτσι ώστε μια γραμμή δεν έχει πλάτος, ένα επίπεδο δεν έχει πάχος– ο Γαλιλαίος εξιδανίκευσε τη μηχανική του, θεωρώντας σκόπιμο να παραβλέψει κάποιες επιδράσεις –όπως την αντίσταση του αέρα– και να διερευνήσει την απλότητα που υπήρχε κάτω απ' τα φαινόμενα. Για να ξεμπερδέψει το κουβάρι της αλληλεξάρτησης των επιδράσεων που κατευθύνει τον φυσικό κόσμο, είναι καλύτερα να ξεκινήσει κανείς μελετώντας ένα-ένα τα νήματα.

Η Νευτωνική σύνθεση

Η έννοια *δύναμη* • Μια κοινή αιτία • Οι αλληλεπιδράσεις • Η μέτρηση της δύναμης • Η δύναμη είναι μέγεθος διανυσματικό • **Η αριστοτελική φυσική** • **Ο πρώτος νόμος της κίνησης** • Η ισορροπία • **Ο δεύτερος νόμος της κίνησης** • Η σχέση της δύναμης με την επιτάχυνση • Η μέτρηση της αδράνειας • Η θεμελιώδης εξίσωση της δυναμικής • Το βάρος και η μάζα • **Ο τρίτος νόμος της κίνησης** • **Νόμοι δυνάμεων** • Μια δύναμη που στηρίζει • Η τριβή • **Δυναμική στην κυκλική κίνηση** • **Η παγκόσμια έλξη** • Και όμως κινείται • Η ιερή κυκλική κίνηση δεν είναι κυκλική • Η παρέμβαση του Νεύτωνα • Το μήλο και το φεγγάρι • Μια έλξη *παγκόσμια* • Ο νόμος της παγκόσμιας έλξης • Βάρος και βαρυτική επιτάχυνση • Οι τεχνητοί δορυφόροι • **Η διατήρηση της ορμής** • **Να σκεφθούμε** • **Να αναρωτηθούμε** • **Να λύσουμε προβλήματα** • **Ντοκουμέντο.**




PHILOSOPHIÆ

NATURALIS

PRINCIPIA

MATHEMATICA.

Autore JS. NEWTON, Trin. Coll. Cantab. Soc. Matheseos Professore Lucasiano, & Societatis Regalis Sodali.

IMPRIMATUR

S. PEPYS, Reg. Soc. PRÆSES.

Julii 5. 1686.

LONDINI,

Jussu Societatis Regiæ ac Typis Josephi Streater. Prostat apud plures Bibliopolas. Anno MDCLXXXVII.

Εξώφυλλο ενός αντίτυπου του βιβλίου. Ο τίτλος στα Λατινικά είναι Philosophiae Naturalis Principia Mathematica. Οι διορθώσεις έχουν γίνει από τον ίδιο τον Νεύτωνα.

Το έτος 1687 κυκλοφόρησε σε 250 αντίτυπα ένα βιβλίο που επρόκειτο να γίνει το θεμέλιο της φυσικής. Είχε τίτλο *Οι Μαθηματικές Αρχές της Φυσικής Φιλοσοφίας*. Το έργο ήταν γραμμένο στα λατινικά από τον Isaac Newton (Άιζακ Νιούτον) τον οποίο συνήθως αποκαλούμε Ισαάκ Νεύτωνα. Ανάμεσα στα ζητήματα που πραγματευόταν, κυρίαρχη θέση είχαν οι τρεις νόμοι της κίνησης, η μελέτη της κίνησης μέσα σ' ένα περιβάλλον που παρουσιάζει αντίσταση και η παγκόσμια έλξη.

Η επίδραση που είχε το έργο αυτό στην εξέλιξη της επιστήμης στα διακόσια χρόνια που ακολούθησαν, και η αξία που εξακολουθεί να έχει ακόμα και σήμερα, είναι γεγονότα που μπορούν να συγκριθούν μόνο με το έργο του Αριστοτέλη. Από άποψη μαθηματικής αξίας τα *Principia*, όπως συνηθίζεται να λέγονται, μόνο με τα *Στοιχεία* του Ευκλείδη μπορούν να συγκριθούν. Όσο για την επιστημονική σημασία τους και την επίδραση στις ιδέες των ανθρώπων, μόνο με την *Προέλευση των ειδών* του Δαρβίνου θα μπορούσαν να παραβληθούν.

Το έργο δεν ήταν κεραυνός που ξέσπασε σε χρόνο ανύποπτο. Στα χρόνια που προηγήθηκαν, γεγονότα και άνθρωποι προετοίμασαν μια ποικιλία από «μονοπάτια», που οδήγησαν σ' αυτό. Οι άνθρωποι είχαν βρεθεί αντιμέτωποι με τεχνολογικά προβλήματα μπροστά στα οποία η εμπειρία είχε αρχίζει να μην θεωρείται αποτελεσματική και να γεννιέται η ανάγκη μιας καινοτομίας. Η ανάγκη αυτή έφερε στην επιφάνεια το ζήτημα της Μεθόδου, που θα άνοιγε το δρόμο στην καινούρια πειραματική επιστήμη. Ταυτόχρονα, μια βαθμιαία αποδέσμευση από φιλοσοφικές, θρησκευτικές και αστρολογικές προκαταλήψεις οδήγησε στη γένεση μιας εντελώς καινούριας Αστρονομίας και αποτέλεσε το λάβαρο μιας επανάστασης που ξέσπασε σε όλη την επιστήμη.

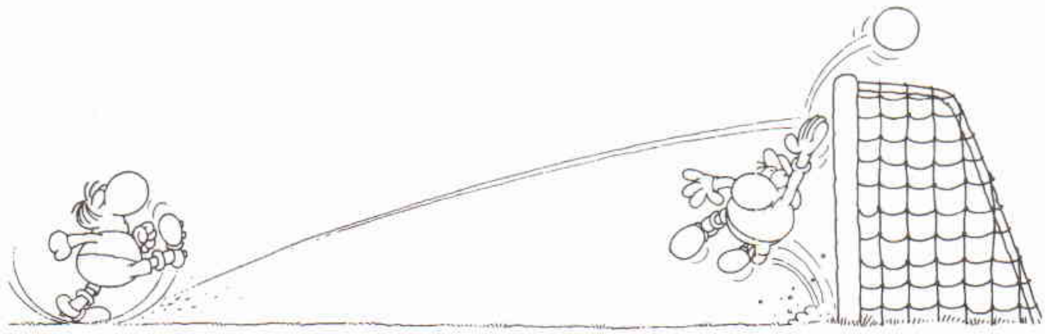
Σ' αυτό το κεφάλαιο θα ασχοληθούμε με ορισμένες βασικές πλευρές της νευτωνικής φυσικής. Στο επίκεντρο βρίσκονται οι τρεις νόμοι της κίνησης και η θεωρία της βαρύτητας. Σ' ολόκληρο το έργο η έννοια *δύναμη* πρωταγωνιστεί. Γι' αυτό κρίνουμε σκόπιμο να ξεκινήσουμε με μια λεπτομερή ανάλυσή της.

Η έννοια δύναμη

Μια κοινή αιτία για τις επιταχύνσεις

Τα γεγονότα

Ο διαιτητής σφύριξε πέναλτι. Η μπάλα τοποθετήθηκε έντεκα βήματα από τη γραμμή του τέρματος, ένας παίκτης πήρε φόρα και σούταρε με το δεξί. Η μπάλα ξεκίνησε με κατεύθυνση το «γάμα» της εστίας, ο τερματοφύλακας τινάχτηκε και απέκρουσε, της άλλαξε δηλαδή την κατεύθυνση.



Λίγα χιλιόμετρα πιο μακριά, σε μια ακρογιαλιά δυο φίλοι σκυμμένοι ψάχνουν για πέτρες λείες και επίπεδες. Μόλις βρουν καμιά που τους αρέσει, την εκσφενδονίζουν επιδέξια προς την κατεύθυνση της θάλασσας. Η πέτρα φτάνει στην επιφάνεια του νερού, κάνει «γκελ», ύστερα και δεύτερο και τρίτο. Στο τέλος βυθίζεται.

Την άλλη μέρα το πρωί ένας υπάλληλος φτάνει μπροστά στην Εθνική Τράπεζα, διαβάζει πάνω στην πόρτα ωθήσατε, τη σπρώχνει και μπαίνει μέσα.

Στο μεταξύ μέσα σε μια σχολική αίθουσα έχει αρχίζει να γίνεται ένα πείραμα. Ο καθηγητής κρατάει στα χέρια του μια μικρή μπίλια.Τη βάζει πάνω στο τραπέζι, τη σπρώχνει για λίγο προς μια κατεύθυνση κι ύστερα την αφήνει. Πάνω στο μεγάλο τραπέζι η μπίλια αρχίζει να κινείται προς την κατεύθυνση που της δόθηκε, αλλά κατά ένα περίεργο τρόπο η τροχιά της καμπυλώνεται. Οι μαθητές μονάχα παρακολουθούν. Γρήγορα διαπιστώνουν ότι κάπου εκεί κοντά βρισκόταν ένας μαγνήτης που επέδρασε πάνω στη σιδερένια

μπίλια και της άλλαξε την κατεύθυνση.

Η θεωρητική σκέψη

Μέσα σ' όλη αυτή την ποικιλία των γεγονότων είναι δύσκολο, ίσως, να διακρίνουμε ότι υπάρχει *κάτι κοινό*. Σε κάθε μία περίπτωση είχαμε ένα τουλάχιστον αντικείμενο που παρουσίασε **μεταβολή στην κινητική του κατάσταση.** Στον ποδοσφαιρικό αγώνα η μπάλα πήγαινε προς τα δίκτυα, αλλά το χέρι του τερματοφύλακα της άλλαξε την κατεύθυνση. Η επιφάνεια της θάλασσας άλλαξε την ταχύτητα της πέτρας, η πόρτα άνοιξε μόλις την έσπρωξε το χέρι του υπαλλήλου, η μπίλια κάτω από την επίδραση του μαγνήτη άλλαξε κατεύθυνση. Ας προσέξουμε λίγο τις αιτίες. Σε κάθε περίπτωση η μεταβολή της κινητικής κατάστασης ήταν αποτέλεσμα μιας διαφορετικής –κάθε φοράς– επέμβασης η επίδρασης, όπως λέμε συνηθέστερα.



Κάθε μεταβολή στην ταχύτητα οποιουδήποτε αντικειμένου σημαίνει ότι ασκείται σ' αυτό κάποια δύναμη.

Η φυσική, για να καταφέρει να περιγράψει με έναν ενιαίο τρόπο όλες αυτές τις φαινομενικά διαφορετικές επιδράσεις, έχει δημιουργήσει ορισμένες αυστηρά προσδιορισμένες έννοιες. Η δύναμη, η ώθηση και η ενέργεια είναι μερικές μόνο από αυτές. Θα περιοριστούμε, προς το παρόν, στη δύναμη. Κάθε φορά που εκδηλώνεται αλλαγή της ταχύτητας –ή αλλιώς *επιτάχυνση*– σε ένα αντικείμενο, η αιτία είναι μια δύναμη. Για να κατανοήσουμε με ποιο τρόπο τη χρησιμοποιεί η Φυσική, θα χρειαστεί προηγουμένως να εξοικειωθούμε με τις έννοιες **σώμα** και **περιβάλλον.**

Για την επιστήμη το *σώμα* είναι μια λογική ενότητα που μπορούμε, κάθε φορά, να την απομονώνουμε με τη σκέψη μας από το υπόλοιπο σύμπαν, που αυτόματα γίνεται *περιβάλλον*. Η μπάλα είναι ένα σώμα. Το ίδιο μπορούμε να πούμε για τη σιδερένια μπίλια την ώρα του πειράματος. Κάθε φορά που θέλουμε να μιλήσουμε για την αιτία αλλαγής της ταχύτητας, λέμε ότι το τάδε αντικείμενο του περιβάλλοντος ασκεί σ' αυτό που εμείς θεωρούμε σώμα μια δύναμη. Το χέρι του τερματοφύλακα ασκεί στην μπάλα δύναμη. Ο μαγνήτης ασκεί στη σιδερένια μπίλια μια δύναμη, όπως και η επιφάνεια τη θάλασσας στην πέτρα που έπεσε πάνω της.

Η δύναμη, λοιπόν περιγράφει την επίδραση του περιβάλλοντος σε συγκεκριμένο σώμα. Μπορούμε να δώσουμε τον ορισμό.

Δύναμη λέγεται η αιτία οποιασδήποτε επιτάχυνσης. Θα τη συμβολίζουμε με το γράμμα **F** αρχικό της λέξης Force που σημαί-

νει *δύναμη*.

Οι επιδράσεις είναι η μία μόνο όψη των αλληλεπιδράσεων

Καθώς ο τερματοφύλακας αποκρούει την μπάλα, ταυτόχρονα χτυπιέται από αυτήν. Σ' αυτή την προσέγγιση, *σώμα* θεωρείται ο ποδοσφαιριστής και η μπάλα αποτελεί αντικείμενο του περιβάλλοντος. Ο μαγνήτης ασκεί επίδραση στην μπίλια, αλλά και αυτή δέχεται επίδραση. Καθώς ο υπάλληλος σπρώχνει την πόρτα της Εθνικής Τράπεζας, αισθάνεται και κάποια επίδραση πάνω του.

Το ζήτημα είναι γενικότερο και αφορά όλες τις επιδράσεις. Μπορούμε, δηλαδή, να πούμε ότι κάθε επίδραση είναι η μία μόνο όψη του νομίσματος **αλληλεπίδραση.** Η δύναμη είναι ένα από τα εκφραστικά εργαλεία, που χρησιμοποιεί η φυσική, στην προσπάθεια της να «μιλήσει» για τις αλληλεπιδράσεις. Περισσότερα πράγματα για όλα αυτά θα συναντήσουμε στον τρίτο νευτωνικό νόμο της κίνησης.

Η μέτρηση της δύναμης

Υπάρχει, όμως, και μια άλλη κατηγορία γεγονότων, που μπορούν να θεωρηθούν αποτελέσματα δυνάμεων. Αξιοποιώντας τις ίδιες μυικές δυνατότητες που μας επιτρέπουν να δημιουργούμε επιταχύνσεις, μπορούμε να τεντώσουμε ένα λάστιχο, να καθαρίσουμε ένα πορτοκάλι με τα χέρια μας, να τσαλακώσουμε ένα φύλλο χαρτί ή να συμπιέσουμε το σωληνάριο για να βγει η οδοντόκρεμα. Και στο μεταξύ ένας μαγνήτης μπορεί να τεντώσει ένα ελατήριο, που θα έχει προσδεμένο στην άκρη του ένα κομμάτι σίδερο. Όλα αυτά είναι γεγονότα που έχουν ένα κοινό γνώρισμα. Σε όλα εμφανίζεται μια *παραμόρφωση των σωμάτων*, με αιτίες, ίδιες με τις αιτίες που προκαλούν επιταχύνσεις.

Οι μεταβολές ταχύτητας και οι παραμορφώσεις είναι, λοιπόν οι δύο κατηγορίες φαινομένων, που η εκδήλωσή τους σημαίνει ότι *ασκείται δύναμη*. Η μέτρηση μιας δύναμης μπορεί να βασιστεί σε οποιαδήποτε από τις δύο κατηγορίες των αποτελεσμάτων της. Είναι όμως, γεγονός ότι το να μετρήσουμε τον βαθμό μιας παραμόρφωσης είναι πολύ πιο βολικό από το να μετρήσουμε μια επιτάχυνση.

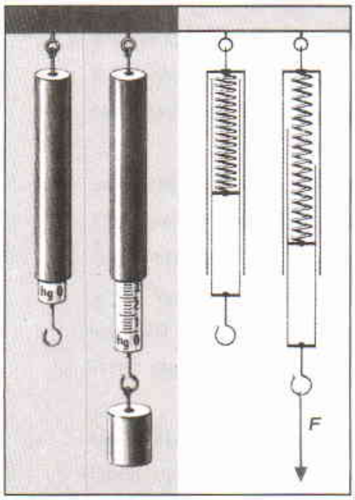
Όλες, όμως, οι παραμορφώσεις προσφέρονται γι' αυτό τον σκοπό; Αν συμπιέσεις ένα κυλινδρικό κομμάτι πλαστελίνης κι ύστε-

ρα το αφήσεις, το κομμάτι θα διατηρήσει το καινούριο σχήμα του. Εννοείται ότι μία εντελώς διαφορετική συμπεριφορά θα παρουσιάσουν σώματα όπως ένα μπαλάκι του τένις, ένα κομμάτι αφρολέξ ή ένα ελατήριο, τα οποία, μόλις τα αφήσεις, θα σπεύσουν να ξαναπάρουν το προηγούμενο σχήμα τους. Τις παραμορφώσεις σαν αυτή της πλαστελίνης τις χαρακτηρίζουμε *πλαστικές*, ενώ για τα άλλα αντικείμενα λέμε ότι εκδηλώνουν ελαστικότητα σχήματος και οι παραμορφώσεις τους χαρακτηρίζονται *ελαστικές*.

Γενικότερα λέμε ότι ένα σώμα παρουσιάζει ελαστικότητα σχήματος εφόσον τείνει να αποκτήσει το προηγούμενο σχήμα του, από τη στιγμή που θα πάψει να επιδρά η αιτία που το έχει μεταβάλλει.

Τα στερεά σώματα όπως οι τοίχοι, τα δοκάρια, τα εργαλεία και τα περισσότερα μέταλλα εκδηλώνουν μία ελαστικότητα σημαντική. Η εκδήλωσή της όμως δεν εξαρτάται μόνο από το υλικό. Ένα ελατήριο, για παράδειγμα, από μια τιμή δύναμης και πάνω παραμορφώνεται μόνιμα και δεν εμφανίζει καμία τάση να επανέλθει στο αρχικό σχήμα του. Αν χτυπήσουμε λίγο με το χέρι το φτερό ενός αυτοκινήτου, η παραμόρφωση είναι ελαστική. Τι γίνεται, όμως, ύστερα από ένα γερό τρακάρισμα;

Ο βαθμός των ελαστικών παραμορφώσεων σε σχέση με τις αιτίες που τις προκαλούν εκφράζεται με έναν από τους πρώτους πειραματικούς νόμους της Φυσικής του 17ου αιώνα. Ο Robert Hooke, ένας Άγγλος της γενιάς του Νεύτωνα, που υπήρξε ένας από τους πιο σημαντικούς πειραματιστές του αιώνα του, διατύπωσε τον σχετικό νόμο υποστηρίζοντας ότι **οι ελαστικές παραμορφώσεις είναι ανάλογες προς τις αιτίες που τις προκαλούν.**



Αν θελήσουμε να εξειδικεύσουμε το νόμο για την περίπτωση του ελατηρίου, σαν μέτρο της παραμόρφωσης θα χρησιμοποιήσουμε τη μεταβολή στο μήκος του ελατηρίου ($\Delta\ell$), ενώ μέτρο της αιτίας θα θεωρήσουμε το μέτρο της δύναμης (F). Μπορούμε να γράφουμε $F = k\Delta\ell$. Το σύμβολο k παριστάνει ένα μέγεθος χαρακτηριστικό της σκληρότητας του ελατηρίου που λέγεται *σταθερά του ελατηρίου*.

Το ελατήριο είναι ένα από τα πιο ενδιαφέροντα αντικείμενα της πειραματικής φυσικής. Μπορεί να τεντώνεται αλλά και αν συμπιέζεται είναι πολύ βολικό για τη μελέτη των αρμονικών ταλαντώσεων κι ακόμα μπορεί να α-

ποθηκεύει σημαντικές ποσότητες δυναμικής ενέργειας. Ένα σωρό κουρδιστά παιχνίδια έχουν σαν βάση λειτουργίας τους αυτή την αποθήκευση.

Χρησιμοποιώντας ένα κατάλληλο ελατήριο μπορούμε να βασιστούμε στον νόμο του Hooke και να κατασκευάσουμε ένα δυναμόμετρο. Στη συνέχεια το βαθμολογούμε βάσει των επιμηκύνσεων που προκαλούν γνωστά βάρη, τα οποία θα κρεμάμε από το άκρο του. Συνοψίζοντας μπορούμε να πούμε ότι τα παραμορφωτικά αποτελέσματα των δυνάμεων μας εξυπηρετούν στο να τις μετρήσουμε. Όσο για την άλλη κατηγορία αποτελεσμάτων, θα τη μελετήσουμε στο δεύτερο νόμο της κίνησης, στον οποίο θα αγνοήσουμε τη μεταβολή μορφής χρησιμοποιώντας το μοντέλο *υλικό σημείο.*

Η δύναμη είναι μέγεθος διανυσματικό

Με το δυναμόμετρο μπορούμε να προσδιορίζουμε το μέτρο μιας δύναμης. Εκτός, όμως, από ένα μέτρο, χρειάζεται να αποδίδουμε σε κάθε δύναμη και μία κατεύθυνση. Και αυτό γιατί αν δύο δυνάμεις με ίσα μέτρα ασκηθούν (όχι ταυτόχρονα) στο ίδιο αντικείμενο χωρίς να έχουν την ίδια κατεύθυνση προκαλούν διαφορετικά αποτελέσματα, οπότε δεν μπορούμε να τις θεωρήσουμε ίσες. Μια δύναμη 8N δεν θεωρείται ίση με μια δύναμη 8N εφόσον ασκείται προς κατεύθυνση διαφορετική. Είναι αναγκαίο, μ' άλλα λόγια, κάθε δύναμη να έχει δύο, τουλάχιστον, στοιχεία ταυτότητας **μέτρο** και **κατεύθυνση.**

Ένα άλλο συμπέρασμα, που βγαίνει από τις πειραματικές διαδικασίες, είναι ότι οι δυνάμεις προστίθενται όπως οι μετατοπίσεις, οι ταχύτητες και οι επιταχύνσεις. Τα δύο συμπεράσματα, ότι δηλαδή οι δυνάμεις οφείλουν

α) να έχουν μέτρο και κατεύθυνση και

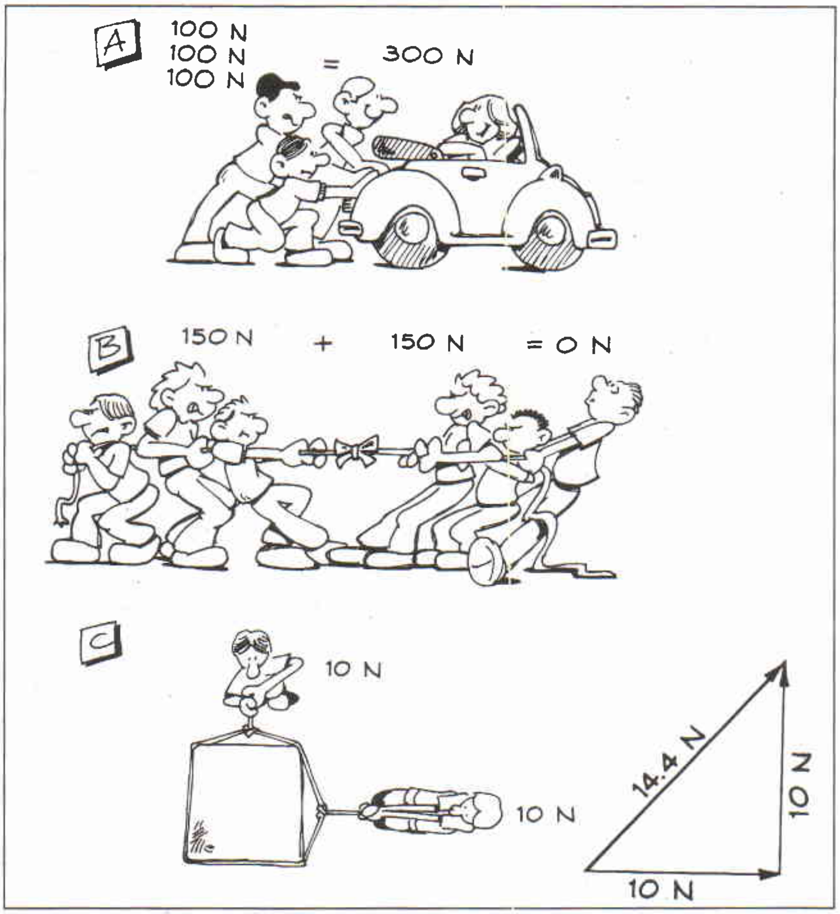
β) να προστίθεται σύμφωνα με τους κανόνες των μετατοπίσεων,

οδηγούν στη διαπίστωση ότι η δύναμη πρέπει να θεωρείται *μέγεθος διανυσματικό.*

Σύνθεση δύο δυνάμεων

Μία δύναμη, εφόσον *μπορεί* να αντικαταστήσει ένα σύνολο, δυνά-

μεων που ασκούνται σε ορισμένο σώμα, λέγεται **συνισταμένη** τους. Η αντικατάσταση έχει την έννοια ότι μπορεί να προκαλέσει στο σώμα αυτό το ίδιο μηχανικό αποτέλεσμα, που προκαλείται από ολόκληρο το σύνολο. Η διαδικασία λέγεται *σύνθεση*.



• Αν οι δυνάμεις έχουν την ίδια κατεύθυνση, η συνισταμένη τους έχει την ίδια αυτή κατεύθυνση και μέτρο ίσο με το άθροισμα των μέτρων τους.

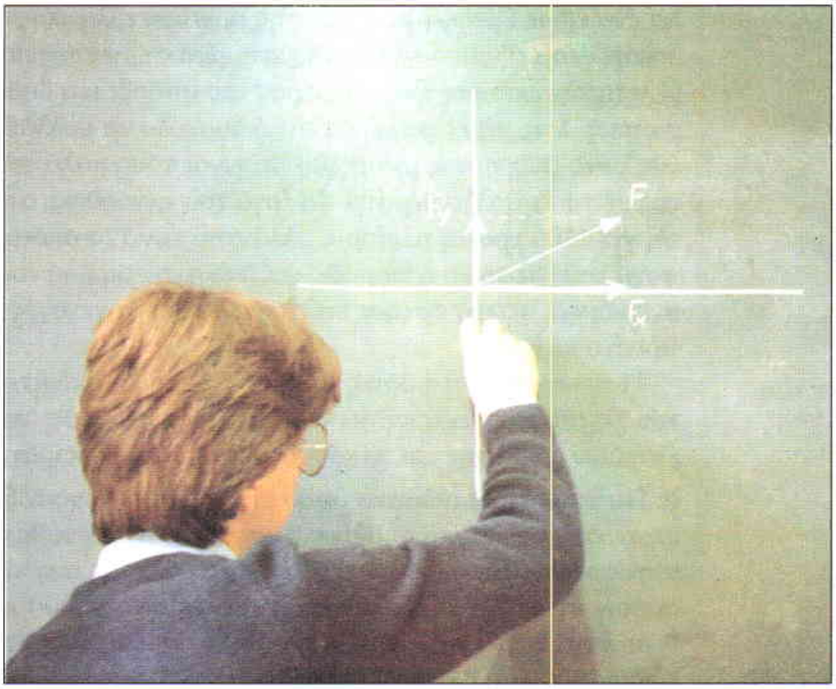
• Αν οι δυνάμεις έχουν κατευθύνσεις αντίθετες, η συνισταμένη τους έχει την κατεύθυνση της μεγαλύτερης και μέτρο ίσο με την απόλυτη διαφορά των μέτρων τους. Σ' αυτή την περίπτωση αν τα μέτρα τους είναι ίσα, η συνισταμένη τους είναι μηδέν.

• Αν οι κατευθύνσεις των δυο δυνάμεων σχηματίζουν γωνία φ, η συνισταμένη τους προσδιορίζεται με τον κανόνα του παραλληλο-

γράμμου ή με τον κανόνα των μετατοπίσεων.

Ανάλυση μιας δύναμης σε συνιστώσες

Σε πολλά προβλήματα είναι αναγκαίο να γίνεται η ανάλυση μιας δύναμης σε δύο **συνιστώσες,** η αντικατάστασή της, δηλαδή από δύο δυνάμεις οι οποίες ασκούμενες αντί γι' αυτήν στο ίδιο σώμα, θα προκαλούσαν το ίδιο αποτέλεσμα.



Ανάλυση μιας δύναμης σε δύο κάθετες συνιστώσες. Αν είναι θ η γωνία των διανυσμάτων F_x και F_y θα ισχύει: $F_x = F$ συνθ και $F_x = F$ ημθ

Το πρόβλημα είναι αόριστο. Μια ορισμένη λύση του θα μπορούσε να υπάρξει μόνο εφόσον, εκτός από τη δύναμη, δίνονται και άλλα στοιχεία, όπως για παράδειγμα οι δύο διευθύνσεις ή η μία από τις συνιστώσες. Το ζήτημα αντιμετωπίζεται με την ίδια λογική που γίνεται και η σύνθεση. Αν η ανάλυση μιας δύναμης, γίνει σε σύστημα ορθογωνίων αξόνων, οι συνιστώσες της αντιστοιχούν στις δύο προβολές του διανύσματος, που την παριστάνει.

Η αριστοτελική φυσική

Ο Αριστοτέλης (Στάγειρα 386 π.Χ. –Χαλκίδα 322 π.Χ.) υπήρξε στοχαστής μεγάλης πρωτοτυπίας και δημιουργικότητας σε μία εκπληκτική ποικιλία πεδίων όπως η Λογική, η Μεταφυσική, η Ποίηση, η Πολιτική, η Βιολογία, η Αστρονομία, η Φυσική. Το έργο του αποτελεί ένα είδος Εγκυκλοπαίδειας της αρχαίας ελληνικής σκέψης. Μολονότι μέσα σ' αυτό είναι ενσωματωμένες εργασίες πολλών άλλων μελετητών, στο μεγαλύτερο μέρος του υπήρξε μια δημιουργία προσωπική. Στις μέρες μας είναι πολύ δύσκολο να συλλάβουμε *πώς* ένας μόνο άνθρωπος μπορούσε να είναι τόσο καλά πληροφορημένος σε τόσα πολλά θέματα. Το έργο του αγνοήθηκε από την Ευρώπη για 1500 χρόνια περίπου, αλλά από τον 12ο αιώνα μέχρι την εποχή του Νεύτωνα η διαρκώς αυξανόμενη επιρροή του πάνω στην ανθρώπινη σκέψη έφτασε να αποτελέσει ένα γεγονός χωρίς, ίσως, προηγούμενο.

Η αριστοτελική φυσική θεωρώντας τη Γη ακίνητη στο κέντρο του Σύμπαντος διέκρινε δύο ξεχωριστούς κόσμους, τον κόσμο των επίγειων σωμάτων και το κόσμο των ουράνιων σωμάτων.

α. Για τα επίγεια σώματα υποστήριζε ότι υπάρχουν δύο είδη κινήσεων, οι φυσικές και οι βίαιες. Η φυσική κίνηση κάθε επίγειου σώματος καθοριζόταν, όπως έχουμε πει, από την αναλογία των τεσσάρων πρωταρχικών στοιχείων που το αποτελούσαν και από τη θέση του. Σε μια ποσότητα νερού που έβραζε, στο στοιχείο *Ύδωρ* προσετίθετο το στοιχείο *Πυρ,* το οποίο έχοντας τη φυσική του θέση ψηλότερα, έσπρωχνε τον ατμό να ανέβει. Αυτή ήταν μία φυσική κίνηση, όπως και η κίνηση ενός σιδερένιου αντικειμένου, που αφηνόταν στον αέρα και έσπευδε να φτάσει στο έδαφος, όπου ήταν η φυσική του θέση.

Καθε κίνηση που παραβίαζε τη φυσική τάση των σωμάτων να κινούνται προς τη φυσική θέση τους εθεωρείτο *βίαιη* και είχε ανάγκη από μια κινητήρια δύναμη. Η άποψη αυτή έβαζε, όμως, πολλά ερωτηματικά. Πως μπορούσε, για παράδειγμα, να κινείται ένα βέλος από τη στιγμή που έχανε την επαφή του με τη χορδή του τόξου; Οι αριστοτελικοί εξηγούσαν τη βίαιη αυτή κίνηση με τη διαταραχή του αέρα, που προκαλούσε η κίνηση. Ο αέρας που συμπιεζόταν στο μπροστινό μέρος του βέλους έπρεπε να σπεύσει στο πίσω μέρος για να αποφευχθεί το κενό που ήταν ανεπίτρεπτο να δημι-



Το Σύμπαν σε γκραβούρα του 17ου αιώνα. Ο άνθρωπος κατάφερε να βγει έξω από την ουράνια σφαίρα και να δει πως δουλεύει το «πρώτο κινούν», που διατηρεί τις σφαίρες σε κίνηση.

ουργηθεί, μια και ένα βασικό αριστοτελικό δόγμα ισχυριζόταν ότι η *φύση απεχθάνεται το κενό.*

β. Για τα ουράνια σώματα τα πράγματα ήταν εντελώς διαφορετικά. Αυτά δεν περιείχαν κανένα από τα τέσσερα στοιχεία της επίγειας ύλης. Ήταν όλα δημιουργημένα από ένα «αγνό» και αμετάβλητο πέμπτο στοιχείο, την *πεμπτουσία.* Για κάθε σώμα που περιείχε την πεμπτουσία *η φυσική κίνηση ήταν μια αδιάκοπη κίνηση σε κυκλική τροχιά* γύρω από το κέντρο του Σύμπαντος, το οποίο συνέπιπτε με το κέντρο της Γης.

Τον 17ο αιώνα η θεωρία αυτή εξακολουθούσε να έχει ισχύ ενός ακόμα δόγματος. Ήταν θεμελιωμένη πάνω στην αντίληψη της τάξης, της ιεραρχίας και του σκοπού, μια αντίληψη απόλυτα αποδεκτή και από την κοινωνία, στην οποία ζούσε ο Γαλιλαίος.

Ο πρώτος νόμος της κίνησης



Ο Isaak Newton (Νεύτων) γεννήθηκε στην Αγγλία 1642 και έζησε μέχρι το 1727. Η επίδραση του έργου του στην κατοπινή εξέλιξη της επιστήμης ήταν κάτι που μόνο με το προηγούμενο του αριστοτελισμού μπορεί να συγκριθεί. Σχεδόν επί δύο αιώνες, μέχρι την εμφάνιση της Θεωρίας της Σχετικότητας, η επιβολή της αυθεντίας του ήταν ολοκληρωτική.

Ας υποθέσουμε ότι μας κάνουν την ερώτηση: *Τι χρειάζεται για να μπορεί ένα σώμα να κινείται αδιάκοπα με σταθερή ταχύτητα;*. Η καθημερινή εμπειρία μάς σπρώχνει σε μια ενστικτώδη απάντηση. Για να μπορεί να διατηρείται η κίνηση πρέπει να ασκείται μια δύναμη που θα τη συντηρεί.

Ένα σπιρτόκουτο βρίσκεται πάνω στη μοκέτα. Όταν το σπρώξουμε και το αφήσουμε, σε λίγο θα σταματήσει. Για να καταφέρουμε να διατηρήσουμε την κίνηση, χρειάζεται να το σπρώχνουμε συνεχώς. Όταν σταματήσουμε να κάνουμε κουπί, η βάρκα θα συνεχίσει για λίγο να κινείται, αλλά ύστερα από μερικά μέτρα θα ακινητοποιηθεί. Ο κατάλογος θα μπορούσε να περιλάβει ένα σωρό τέτοια παραδείγματα. Οι εικόνες που έχουμε γι' αυτά μας λένε αυτό που ισχυριζόταν και ο Αριστοτέλης, ότι δηλαδή, για «να μπορεί» να κινείται ένα αντικείμενο, έχει την ανάγκη μιας δύναμης, διαφορετικά θα «θελήσει» να επιστρέψει στη «φυσική» του κατάσταση, που είναι η ακινησία.

Η αντίρρηση του Γαλιλαίου σχετίζεται με αυτό που συνήθως ξεχνάμε, όταν βιαζόμαστε να απαντήσουμε σε τέτοια ερωτήματα. Ότι ζούμε σε έναν κόσμο γεμάτο τριβές και αντιστάσεις. Αν σηκώσουμε τη μοκέτα και βάλουμε το σπιρτόκουτο στο πάτωμα δίνοντάς του την ίδια πάντα ώθηση, θα το δούμε να απομακρύνεται περισσότερο. Αν τρίψουμε το πάτωμα μέχρι να γυαλίσει, το σώμα θα πάει ακόμα πιο μακριά. Εκείνο που φαντάστηκε ο Γαλιλαίος βασιζόταν σε ένα παραπέρα αν. Αν καταφέρουμε να εξουδετερώσουμε τελείως τις τριβές πάνω σ' ένα επιστημονικής φαντασίας μακρύ διάδρομο, το σπιρτόκουτο δεν θα σταματήσει ποτέ.

Αυτό που φαντάστηκε ο Γαλιλαίος και το διατύπωσε με σαφήνεια ο Νεύτων ήταν ότι **ένα σώμα μπορεί να κινείται, χωρίς να ασκείται σ' αυτό καμία δύναμη, διατηρώντας την ταχύτητά του σταθερή.** Σύμφωνα με την άποψη αυτή, *η δύναμη έπαψε να είναι αιτία της κίνησης* και απέκτησε ένα καινούριο νόημα. Η δύναμη *έγινε αιτία μεταβολής της κίνησης*.

Χωρίς καμία δύναμη το σπιρτόκουτο ύστερα από την αρχική

ώθηση θα κινείται με σταθερή ταχύτητα, γεγονός εξίσου φυσικό με το ότι θα παρέμενε ακίνητο αν το αφήναμε στη θέση του, χωρίς να το πειράξουμε. Εκείνο που σταματάει τη βάρκα δεν είναι ότι πάψαμε να κάνουμε κουπί. Είναι η αντίσταση του νερού. Αν δεν υπήρχε αντίσταση, η βάρκα θα συνέχιζε να σχίζει το νερό με σταθερή ταχύτητα χωρίς να χρειάζεται καμία βοήθεια εκ μέρους μας. Όλα ανεξαιρέτως τα σώματα εκδηλώνουν μία τάση –όχι μόνο να παραμένουν ακίνητα, αλλά– να διατηρούν την κινητική τους κατάσταση. Η τάση αυτή αποτελεί μία θεμελιακή ιδιότητα της ύλης που λέγεται **αδράνεια** και ο νόμος που την περιγράφει λέγεται **νόμος της αδράνειας.**

Για τον Νεύτωνα, ο νόμος της αδράνειας θεωρείται ο πρώτος από τους τρεις νόμους της κίνησης και ισχύει όχι μόνο για τα επίγεια αλλά και για κάθε σώμα οπουδήποτε στο Σύμπαν. Ήταν η πρώτη, ίσως, φορά που η Δυτική σκέψη αρνιόταν τη διάκριση σε νόμους επίγειους και σε νόμους των τέλειων Ουρανών. Διατυπώνοντάς τον στα Λατινικά έγραψε ότι **«κάθε σώμα διατηρεί την κατάσταση ακινησίας ή ευθύγραμμης ομαλής κίνησης εφόσον δεν ασκείται σ' αυτό δύναμη».**

Αν θελήσουμε να φωτίσουμε τα πιο σημαντικά σημεία του πρώτου νόμου της κίνησης θα προσέξουμε ότι:

1. Εισάγει την έννοια *αδράνεια* θεωρώντας την σαν θεμελιακή ιδιότητα της ύλης. Σύμφωνα μ' αυτήν, κάθε σώμα εκδηλώνει την τάση να διατηρεί την κινητική του κατάσταση.

2. Δέχεται ότι η ισχύς του νόμου επεκτείνεται και στα ουράνια σώματα, ότι είναι μ' άλλα λόγια ένας *νόμος παγκόσμιος*.

3. Εισάγει μια ισοδυναμία ανάμεσα στις δύο καταστάσεις, την κατάσταση ακινησίας και την κατάσταση ευθύγραμμης ομαλής κίνησης.

Ακόμα και σήμερα, τρεις αιώνες μετά τη διατύπωσή της, η ιδέα ότι *ένα αντικείμενο μπορεί να κινείται μόνο του χωρίς καμια δύναμη να το βοηθάει,* ακούγεται παράξενα.

Θα μπορούσαμε να την ενισχύσουμε φέρνοντας στο μυαλό μας γεγονότα καθημερινής ζωής, όπως αυτό μιας σφαίρας που κυλίεται στην επιφάνεια παγωμένης λίμνης, του αυτοκινήτου που συνεχίζει να κινείται με ταχύτητα στο «νεκρό», του σώματός μας που εξακολουθεί να κινείται όταν το αυτοκίνητο φρενάρει α-

πότομα και δεν φοράμε τη ζώνη ασφαλείας.

Μπορούμε, όμως, να προσφύγουμε στο εργαστήριο για να πειραματιστούμε με την κίνηση ενός αντικειμένου σε επιφάνεια με ασήμαντες τριβές.



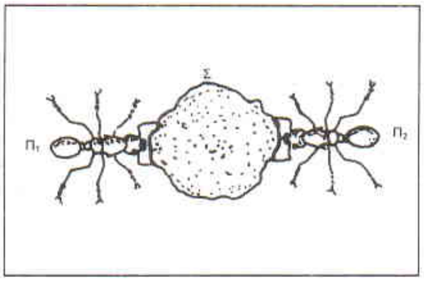
Πάνω σε οριζόντιο επίπεδο που μπορεί να είναι η βάση της αεροτράπεζας ή μια επιφάνεια, στην οποία έχουμε φροντίσει να ελαχιστοποιήσουμε τις τριβές, βάζουμε ένα μικρό αντικείμενο, το οποίο ωθούμε και το αφήνουμε. Στη συνέχεια προσπαθούμε να εντοπίζουμε τη θέση του ανά ίσα χρονικά διαστήματα. Αυτό το τελευταίο μπορούμε να το πετύχουμε με τη στροβοσκοπική μέθοδο. Θα έχουμε ένα σώμα που θα κινείται χωρίς να δέχεται συνισταμένη δύναμη, για το οποίο, αν δουλέψουμε προσεκτικά, είναι δυνατόν να διαπιστώσουμε ότι θα διανύει σε ίσους χρόνους ίσα διαστήματα.

Εκείνο, όμως, που είναι περισσότερο πειστικό είναι η **διαστημική εμπειρία**. Στις 2 Μαρτίου του 1972 εκτοξεύτηκε το διαστημόπλοιο Pionner-10 από τον πύραυλο Atlas-Centaur με ταχύτητα 51.810 km/h η οποία απαιτείται για να ταξιδεύσει προς τον πλανήτη Δία. Το Φεβρουάριο του 1996 το διαστημόπλοιο βρισκόταν 9,5 δισεκατομμύρια χιλιόμετρα μακριά από τη Γη εκπέμποντας ραδιοκύματα που χρειαζόταν πάνω από 8,5 ώρες για να φτάσουν στη Γη.

Σήμερα, το Pionner-10, μακριά από το ηλιακό μας σύστημα, εξακολουθεί να ταξιδεύει *χωρίς να το προωθεί καμιά δύναμη*. Εννοείται ότι στον 17ο αιώνα του Γαλιλαίου και του Νεύτωνα εμπειρίες τέτοιου είδους ήταν ανύπαρκτες.

Η ισορροπία

Στον πρώτο νόμο της κίνησης γίνεται δεκτό ότι δεν υπάρχει καμιά διαφορά ανάμεσα (α) στην περίπτωση που δεν ασκούνται καθόλου δυνάμεις και (β) στην περίπτωση που ασκούνται αλλά η συνισταμένη τους είναι μηδέν. Δεχόμαστε μ' άλλα λόγια ότι *είναι δυνατόν* να ασκούνται σ' ένα σώμα δυνάμεις και να μην εκδηλώνεται καμιά μεταβολή στην κινητική του κατάσταση. Λέμε τότε ότι *το σώμα ισορροπεί,* πράγμα που σημαίνει είτε ότι ακινητεί είτε ότι κινείται με σταθερή ταχύτητα. Ας μην ξεχνάμε ότι ο πρώτος νόμος θεωρεί τις δύο καταστάσεις ισοδύναμες. Όσο για τις ασκούμενες δυνάμεις χρησιμοποιούμε τη διατύπωση *οι δυνάμεις ισορροπούν.*



Τα δύο μηρμύγκια είναι από διαφορετικές φωλιές. Τραβάνε το ψίχουλο, αλλά αυτό μένει ακίνητο. Μπορούμε να γράψουμε $\vec{F}_1+\vec{F}_2 = 0$.

Τίθεται το ερώτημα. Ποιες είναι οι αλγεβρικές σχέσεις μεταξύ δυνάμεων ασκουμένων σε σημειακό αντικείμενο το οποίο ισορροπεί; Πως μπορούμε ξεκινώντας από το γεγονός ότι η συνισταμένη τους είναι μηδέν να οδηγηθούμε σε αυτές τις σχέσεις;

Μια καλή μέθοδος για τη μελέτη του ζητήματος είναι η *αναλυτική* μέθοδος. Αναλύουμε καθεμιά από τις ασκούμενες δυνάμεις σε δύο κάθετες συνιστώσες έτσι ώστε όλες οι συνιστώσες να βρίσκονται σε δύο κάθετους άξονες, τον x και το y.

Περιοριζόμενοι σε ομοεπίπεδες δυνάμεις μπορούμε να αποδείξουμε ότι το άθροισμα των αλγεβρικών τιμών των συνιστωσών κατά τον άξονα x (το οποίο συμβολίζουμε με ΣF_x) πρέπει να είναι ίσο με μηδέν και ότι το ίδιο πρέπει να ισχύει και για το αντίστοιχο άθροισμα (ΣF_y) κατά τον άξονα y. Γράφουμε: $\Sigma F_x = 0$ και $\Sigma F_y = 0$.

Ισχύει όμως και το αντίστροφο. Αν ισχύουν οι δύο αλγεβρικές εξισώσεις το αντικείμενο θα βρίσκεται σε ισορροπία. Δεν χρειάζεται δηλαδή να ισχύει και κάποια τρίτη εξίσωση.

Τα παραπάνω αφορούν και στην περίπτωση που το αντικείμενο είναι ένα σώμα με διαστάσεις με την προϋπόθεση οι ασκούμενες δυνάμεις να έχουν φορείς (ευθείες στις οποίες ανήκουν τα αντίστοιχα διανύσματα) διερχόμενους από το ίδιο σημείο.

$\mathbf{\Sigma F_x = 0}$ *Ισορροπία*
$\mathbf{\Sigma F_y = 0}$ *ομοεπιπέδων δυνάμεων*

Να συνοψίσουμε. Οι δύο αλγεβρικές εξισώσεις $\Sigma F_x = 0$ και $\Sigma F_y = 0$ αποτελούν **αναγκαία και ικανή συνθήκη για την ισορροπία ομοεπιπέδων δυνάμεων.** Μ' άλλα λόγια,

α) Όταν είναι γνωστό ότι ένα σημειακό αντικείμενο ισορροπεί, οι δύο εξισώσεις μάς πληροφορούν για τους συσχετισμούς των δυνάμεων που ασκούνται σ' αυτό.

β) Μπορούμε να προβλέψουμε ότι ένα σημειακό αντικείμενο θα διατηρεί την κινητική κατάσταση που έχει σε μια ορισμένη στιγμή, εφόσον γνωρίζουμε ότι $\Sigma F_x = 0$ και $\Sigma F_y = 0$.

Ο δεύτερος νόμος της κίνησης

Η ιδιότητα *αδράνεια* και το μέγεθος *μάζα*

Στον πρώτο νόμο κίνησης, η αδράνεια θεωρήθηκε ως μία τάση των σωμάτων στο να διατηρούν την κινητική τους κατάσταση. Η τάση αυτή εκδηλώνεται με την «επιμονή» του σώματος να διατηρεί μία σταθερή ταχύτητα, εφόσον δεν επιδρούν σ' αυτό δυνάμεις αλλά και αν επιδρούν, η συνισταμένη τους να είναι ίση με μηδέν.

Τι συμβαίνει, όμως, αν ασκούνται δυνάμεις που δεν αλληλοεξουδετερώνονται, που έχουν δηλαδή κάποια συνισταμένη; Σ' αυτή την περίπτωση –σύμφωνα με τον ορισμό της δύναμης– το σώμα θα παρουσιάσει επιτάχυνση, η ταχύτητά του θα μεταβάλλεται αδιάκοπα. Τι γίνεται τότε με την αδράνειά του; Η ιδιότητα υπάρχει πάντοτε, μόνο που είναι προτιμότερο, σ' αυτή την περίπτωση να λέμε ότι εκδηλώνεται σαν μια *αντίσταση στις μεταβολές της ταχύτητας*.

Η ίδια δηλαδή, ιδιότητα, η αδράνεια των σωμάτων περιγράφεται

α) στην χωρίς κίνηση σαν μια *τάση για διατήρηση της κινητικής τους κατάστασης*

β) στη μεταβαλλόμενη κίνηση σαν μια *αντισταση την οποία εκδηλώνουν κατά τις μεταβολές της ταχύτητάς τους.*

Πέρα απ' αυτό, όμως, η αδράνεια-αντίσταση εμφανίζει και ένα χαρακτήρα ποσοτικό. Στην ίδια μεταβαλλόμενη κίνηση τα διάφορα σώματα δεν εκδηλώνουν το ίδιο έντονα την αντίσταση τους κατά τις μεταβολές της ταχύτητάς τους. Είναι πολύ πιο δύσκολο να επιταχυνθεί μια σιδερένια μπίλια σε σχέση με ένα ίδιου μεγέθους μπαλάκι του πινγκ-πονγκ. Το γεγονός αυτό μας έχει οδηγήσει στο να ποσοτικοποιήσουμε την ιδιότητα-αδράνεια επινοώντας για κάθε σώμα ένα μέγεθος που να μπορεί να τη μετράει. Το μέγεθος που χρησιμοποιούμε για να κατατάξουμε τις αδράνειες των διαφόρων σωμάτων λέγεται *αδρανειακή μάζα ή* απλά *μάζα.*

Μάζα ενός σώματος λέγεται το μέτρο της αδράνειας του σώματος αυτού.

Το ερώτημα

Ενώ ο πρώτος νόμος της κίνησης απαντά στο ερώτημα: *τι συμβαίνει σ' ένα σώμα στο οποίο δεν ασκείται δύναμη;* υπονοώντας –με τον όρο *δύναμη*– τη συνισταμένη, το ερώτημα στο οποίο απαντά ο δεύτερος νόμος είναι: *τι συμβαίνει σ' ένα σώμα στο οποίο ασκείται δύναμη;* υποδηλώνοντας και αυτός τη συνισταμένη.

Ο δεύτερος νόμος της κίνησης έχει επικρατήσει να λέγεται θεμελιώδης νόμος της Δυναμικής. Αποδεχόμενος τον ορισμό της δύναμης –σύμφωνα με τον οποίο εφόσον σ' ένα σώμα ασκείται δύναμη το σώμα θα έχει επιτάχυνση– επιχειρεί να απαντήσει και στο ερώτημα

από τι καθορίζεται η επιτάχυνση ενός σώματος;

και διακηρύσσει ότι η *επιτάχυνση ενός σώματος διαμορφώνεται* τόσο *α) από τη συνισταμένη των ασκουμένων δυνάμεων όσο και β) από τη μάζα του σώματος.*

Για να τον κατανοήσουμε θα χρειαστεί να εξετάσουμε χωριστά τον ρόλο που παίζει η μάζα και τον ρόλο που παίζει η δύναμη στη διαμόρφωση της επιτάχυνσης.

Η μέτρηση της μάζας

Αν σπρώξουμε το ίδιο δυνατά το άδειο κουτί της μπύρας και το γεμάτο με μπύρα κουτί, το άδειο επιταχύνεται περισσότερο. Αν, δηλαδή, του δώσουμε μια σπρωξιά καταλαβαίνουμε ότι έχει μικρότερη μάζα. Πόση όμως είναι η μάζα του; Και γενικότερα: *Πώς μπορούμε να μετρήσουμε τη μάζα ενός σώματος;* Η ιδέα είναι να ασκήσουμε ίσες δυνάμεις σε δύο διαφορετικά αντικείμενα και να συγκρίνουμε τις επιταχύνσεις τους. Οι δύο δυνάμεις μπορούν να θεωρηθούν ίσες εφόσον προκαλούν την ίδια παραμόρφωση στο ίδιο ελατήριο. Οι σχετικές μετρήσεις δείχνουν ότι ο *λόγος των μαζών των δύο αντικειμένων είναι ίσος με το αντίστροφο του λόγου των επιταχύνσεων που θα αποκτήσουν, υπό την επίδραση ίσων δυνάμεων.*

$$\frac{m_1}{m_2}=\frac{\alpha_2}{\alpha_1}$$

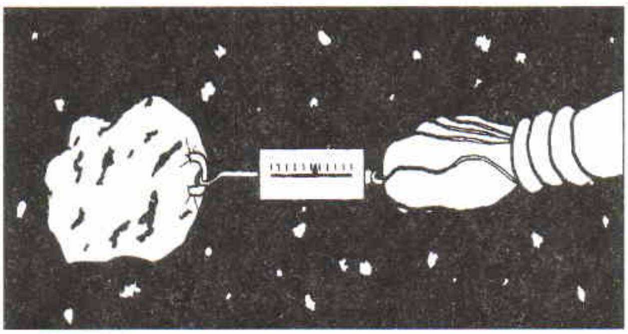
Αν το ένα από τα δύο σώματα το θεωρήσουμε ως **πρότυπο μάζας,** όπως για παράδειγμα το πρότυπο χιλιόγραμμο (kg) τους Διεθνούς συστήματος (S.I), θα μπορούμε να υπολογίζουμε τη μάζα του άλλου σώματος. Ο *ζυγός αδράνειας* αποτελεί μια τεχνική που

μας επιτρέπει να μετράμε τη μάζα ενός οποιουδήποτε αντικειμένου.

Η σχέση της δύναμης με την επιτάχυνση

Το άδειο φλιτζάνι βρίσκεται πάνω στο τραπέζι. Αν το σπρώξουμε θα επιταχυνθεί και αν το σπρώξουμε πιο δυνατά θα επιταχυνθεί περισσότερο. Η καθημερινή εμπειρία είναι βέβαια καθοδηγητική αλλά δεν επαρκεί αν θέλουμε να καταλήξουμε σε κάποιο νόμο. Αφήνει αναπάντητα ερωτήματα όπως το «*η επιτάχυνση που θα αποκτήσει είναι ανάλογη προς τη δύναμη που ασκείται αυτό;*» ή το «*πόση δύναμη πρέπει να ασκηθεί σε μια μπίλια για να αποκτήσει επιτάχυνση 1 m/s;*» Χρειάζεται να καταφύγουμε στο εργαστήριο. Να ανακρίνουμε την πραγματικότητα στη γλώσσα των εννοιών και να πάρουμε από αυτήν τις απαντήσεις.

Χρειαζόμαστε ένα σώμα στο οποίο να ασκείται κάποια δύναμη. Τη δύναμη αυτή θα πρέπει να μπορούμε να τη μετράμε και να έχουμε φροντίσει να είναι συνισταμένη όλων των δυνάμεων. Πρέπει επίσης να βρούμε έναν τρόπο να καταγράφουμε την επιτάχυνση του σώματος. Για τη μέτρηση της δύναμης θα μας εξυπηρετήσει ένα δυναμόμετρο.

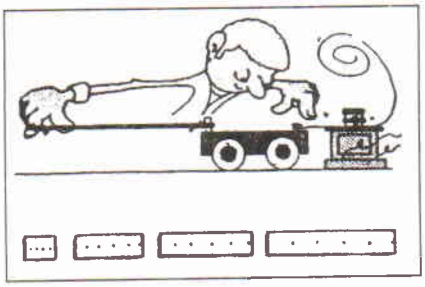


Για την επιτάχυνση θα χρειαστούμε μετροταινία και χρονόμετρο. Οι δυσκολίες είναι πολλές. Η ιδανική διαδικασία θα ήταν ένα πείραμα στο διάστημα σε περιοχή χωρίς βαρύτητα έτσι ώστε η μοναδική δύναμη να προέρχεται από το ελατήριο.

Στο γήινο εργαστήριό μας η πειραματική έρευνα μπορεί να γίνει πάνω σε αεροτράπεζα. Ένα αντίστοιχο πείραμα μπορεί να γίνει πάνω σε συνηθισμένο τραπέζι εργαστηρίου, με τροχαλία, ηλεκτρικό χρονομετρητή και καροτσάκι.

Η μία άκρη της χαρτοταινίας προσδένεται στο καροτσάκι.

Από τα ίχνη στη χαρτοταινία μπορούμε να προσδιορίσουμε την επιτάχυνση. Το πείρασμα μπορεί, επίσης, να γίνει με ένα λάστιχο



προσδεδεμένο στο καροτσάκι.

Βασιζόμενοι στις μετρήσεις διατυπώνουμε το πρώτο συμπέρασμα:

Εφόσον η δύναμη παραμένει σταθερή, η κίνηση του σώματος είναι ομαλά επιταχυνόμενη. Σταθερή, μ' άλλα λόγια, δύναμη προκαλεί σταθερή επιτάχυνση.

Στη συνέχεια διπλασιάζουμε τη δύναμη που ασκούμε στο ίδιο σώμα και μετρώντας τη νέα επιτάχυνση εξακριβώνουμε ότι είναι διπλάσια της προηγούμενης. Αν τριπλασιάσουμε τη δύναμη –χρησιμοποιώντας πάντα το ίδιο σώμα–, θα διαπιστώσουμε τον τριπλασιασμό της επιτάχυνσης και αυτή η αναλογία θα συνεχίζεται. Τα μέχρι τώρα συμπεράσματα διατυπώνονται με την πρόταση:

Η επιτάχυνση (αποτέλεσμα) ενός σώματος είναι ανάλογη με τη δύναμη (αίτιο) που ασκείται σ' αυτό και έχει την ίδια κατεύθυνση μ' αυτήν.

Η θεμελιώδης εξίσωση της δυναμικής

Ας επιχειρήσουμε να συνοψίσουμε. Ενώ στην πρώτη σειρά πειραμάτων ασχοληθήκαμε με δυο διαφορετικά σώματα, ασκήσαμε και στα δύο την ίδια δύναμη και «μετρήσαμε» τη μάζα του ενός σε σχέση με τη μάζα του άλλου, τη δεύτερη φορά ασχοληθήκαμε μ' ένα σώμα και φτάσαμε στα συμπεράσματα που διατυπώσαμε.

Όλα τα συμπεράσματα που βγήκαν από τα πειράματα καθώς και όλα αυτά που συμφωνήσαμε, μπορούν να συμπεριληφθούν στο δεύτερο νόμο της κίνησης ο οποίος λέγεται και θεμελιώδης νόμος της Δυναμικής:

Η ασκούμενη σε ένα σώμα δύναμη προκαλεί επιτάχυνση με την κατεύθυνση της δύναμης και μέτρο ίσο με το πηλίκο της δύναμης προς τη μάζα του σώματος.

Στη γλώσσα των συμβόλων ο νόμος εκφράζεται με τη λεγόμενη Θεμελιώδη εξίσωση της Δυναμικής.

$$\vec{\alpha} = \frac{\vec{F}}{m}$$

Μια άλλη ισοδύναμη γραφή αυτής της εξίσωσης είναι η

$$\vec{F} = m\vec{\alpha}$$

Στο διεθνές σύστημα μονάδων, η μονάδα μάζας 1 kg θεωρείται **θεμελιώδης.** Είναι η μάζα ενός κυλίδρου από λευκόχρυσο με ορισμένες διαστάσεις και φυλάγεται στο Διεθνές Γραφείο Μέτρων και Σταθμών.

Χρησιμοποιώντας τον δεύτερο νόμο της κίνησης μπορούμε να ορίσουμε ως μονάδα δύναμης τη δύναμη η οποία ασκούμενη σε σώμα μάζας 1 kg προκαλεί επιτάχυνση $1 m/s^2$. Η μονάδα αυτή λέγεται 1 Newton –προς τιμή του I. Newton– και συμβολίζεται με 1 N. Το 1 N είναι, περίπου, η δύναμη που ασκεί ο αντίχειρας στο πίσω μέρος του στυλό για να βγει η μύτη.

Κάποιες παρατηρήσεις

1. Ο δεύτερος νόμος της κίνησης δίνει την απάντηση στο πολύ βασικό ερώτημα

Από τι εξαρτάται η μεταβολή της κινητικής κατάστασης ενός αντικειμένου;

Η απάντηση που δίνει είναι ότι ο ρυθμός μεταβολής της ταχύτητας (η επιτάχυνση) ενός αντικειμένου καθορίζεται τόσο από τη συνολική δύναμη που θα ασκηθεί πάνω του όσο και από τη μάζα του.

Και η μεν δύναμη (που εκπροσωπεί τη συνολική επίδραση που δέχεται το αντικείμενο από το περιβάλλον του) καθορίζει την κατεύθυνση της επιτάχυνσης, αλλά συμμετέχει και στη διαμόρφωση του μέτρου της.

Από την άλλη το ίδιο το αντικείμενο συμμετέχει στη διαμόρφωση της επιτάχυνσής του, όχι βέβαια σαν κατεύθυνση αλλά σαν μέτρο. Η συμμετοχή του αυτή εκφράζεται με τη μάζα του.

2. Γιατί, όμως, ορισμένες φορές, παρόλο που ασκούμε κάποια δύναμη, «δεν γίνεται τίποτα;».

0,1 N



Δύναμη που ασκεί ένα ελατήριο ρολογιού πάνω στο μηχανισμό του.

1 N



Δύναμη που ασκεί ο αντίχειρας στο πίσω μέρος του στυλό\

10 N



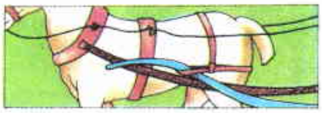
Δύνομη που εξασκούμε για να ανοίξουμε ένα ντουλάπι που κλείνει με μαγνήτη.

1 00 N



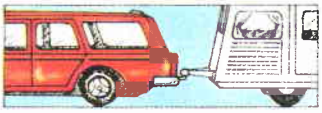
Δύναμη του ποδιού πάνω στο πεντάλ του φρένου ενός αυτοκινήτου.

1000 N



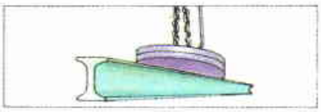
Δύναμη έλξεως ενός αλόγου

10 000 N

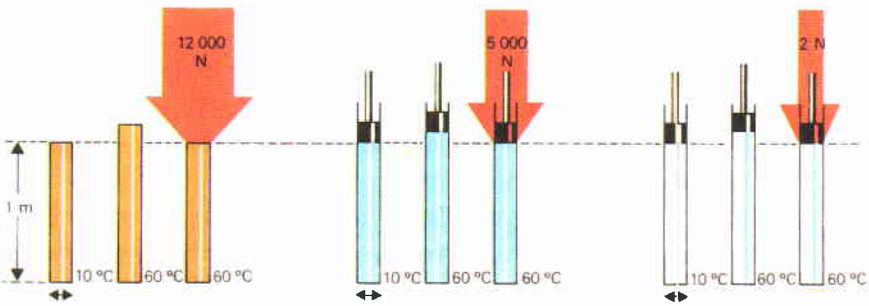


Δύναμη έλξεως ενός αυτοκινήτου πάνω στο τροχόσπιτο

100 0000 N



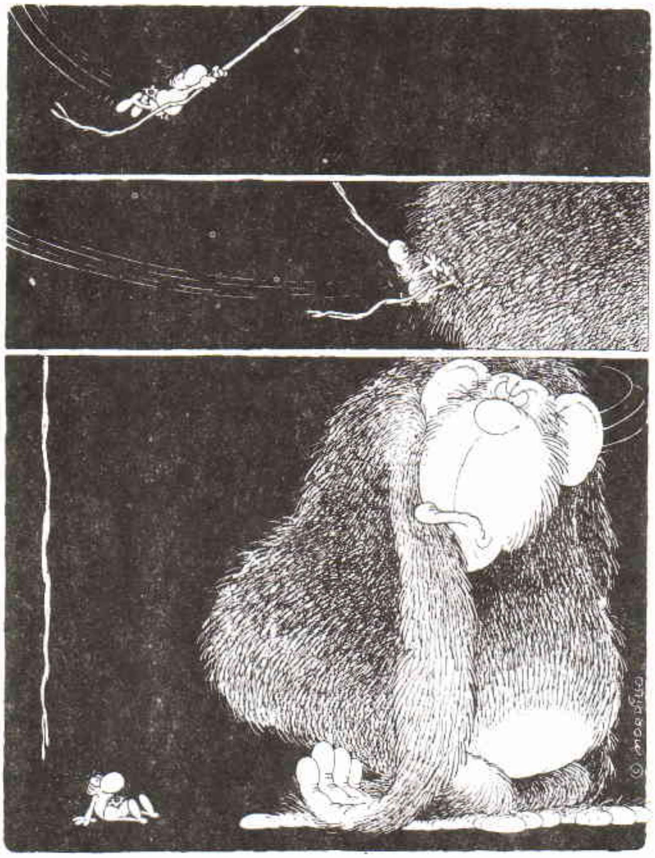
Δύναμη ενός μεγάλου ηλεκτρομαγνήτη.



ΟΡΕΙΧΑΛΚΟΣ
Η ορειχάλκινη ράβδος διαστέλλεται κατά 1 mm περίπου. Για να εμποδίσουμε αυτή τη διαστολή, θα πρέπει να ασκήσουμε πάνω στη ράβδο δύναμη 12.000 N.

ΟΙΝΟΠΝΕΥΜΑ
Η στήλη οινοπνεύματος διαστέλλεται κατά 5 cm περίπου. Για να εμποδίσουμε αυτή τη διαστολή, θα πρέπει να ασκήσουμε πάνω στο έμβολο δύναμη 5.000 N.

ΑΕΡΑΣ
Η στήλη του αέρα διαστέλλεται κατά 18,3 cm. Για να εμποδίσουμε τη διαστολή του, θα πρέπει να ασκήσουμε στο έμβολο δύναμη 2 N.



Ας δοκιμάσουμε να σπρώξουμε ένα βαρύ φορτηγό ή έναν συνηθισμένο ελέφαντα. Είναι ένα ερώτημα που θα τεθεί και παρακάτω στο κεφάλαιο της στατικής τριβής.

Θα σπεύσουμε όμως από τώρα να δώσουμε απάντηση. Παρόλο που ασκούμε δύναμη στο φορτηγό ή στον ελέφαντα, η δύναμη αυτή εξουδετερώνεται από τη στατική τριβή που ασκεί το έδαφος, με συνέπεια να ασκούνται δυνάμεις αλλα η συνισταμένη τους να είναι μηδέν. Πρέπει, δηλαδή να προσέξουμε ότι στη θεμελιώδη εξίσωση όταν γράφουμε $F = m\alpha$, με το σύμβολο F παριστάνουμε τη συνισταμένη όλων των δυνάμεων που ασκούνται στο σώμα.

3. Ο δεύτερος νόμος μας εξυπηρετεί στο **να προβλέψουμε** την εξέλιξη μιας κίνησης, από μια ορισμένη χρονική στιγμή και πέρα, εφόσον

α) είναι γνωστή η θέση και η ταχύτητα του σημειακού αντικειμένου εκείνη τη στιγμή

β) είναι γνωστή η μάζα του και

γ) υπάρχουν όλες οι πληροφορίες για την επίδραση του περιβάλλοντος πάνω στο αντικείμενο.

Με βάση αυτό το τελευταίο μπορούμε να προσδιορίσουμε όλες τις δυνάμεις που ασκούνται στο αντικείμενο και να βρούμε τη συνισταμένη τους. Το επόμενο βήμα είναι να εφαρμόσουμε το δεύτερο νόμο και με βάση τη συνισταμένη των δυνάμεων και τη μάζα να προσδιορίσουμε την επιτάχυνση. Παίρνοντας τέλος υπόψη την αρχική θέση και την αρχική ταχύτητα, θα προχωρήσουμε στην περιγραφή της κίνησης.

4. Η θεμελιώδης εξίσωση είναι μια εξίσωση διανυσματική. Κανονικά πρέπει να γράφουμε $\vec{F} = m\vec{\alpha}$. Αν οι δυνάμεις που ασκούνται αντιστοιχούν σε διανύσματα ομοεπίπεδα, από την εξίσωση μπο-

ρούμε να πάρουμε δύο αλγεβρικές εξισώσεις, την $\Sigma F_x = m\alpha$ και την $\Sigma F_y = 0$, όπου ΣF_x το αλγεβρικό άθροισμα των συνιστωσών των ασκουμένων δυνάμεων κατά τη διεύθυνση της επιτάχυνσης και ΣF_y το αντίστοιχο αλγεβρικό άθροισμα κατά μία διεύθυνση κάθετη στην επιτάχυνση.

$$\vec{F} = m\vec{\alpha}$$

$\Sigma Fx = m\alpha$	Αλγεβρικές
$\Sigma Fy = 0$	εξισώσεις

Μέχρι τις αρχές του αιώνα μας ο θεμελιώδης νόμος με τη μορφή F=mα στεκόταν ακλόνητος χωρίς καμιά αμφισβήτηση. Ο Albert Einstein (1879-1955) έδωσε το πρώτο χτύπημα. Στη θεωρία της σχετικότητας ισχυρίστηκε ότι η αδρανειακή μάζα δεν είναι σταθερή αλλά αυξάνει με την ταχύτητα. Η μεταβολή ωστόσο της αδρανειακής μάζας, που προβλέπει η θεωρία της σχετικότητας είναι υπολογίσιμη μόνο στις πολύ μεγάλες ταχύτητες, συγκρίσιμες με την ταχύτητα του φωτός.

Για όλες τις ταχύτητες των συνηθισμένου μεγέθους σωμάτων, η αδρανειακή μάζα είναι πραγματικά σταθερή και η εξίσωση F=mα ισχύει. Μόνο για ατομικά και πυρηνικά σωμάτια, ηλεκτρόνια, πρωτόνια κ.ά., που αποκτούν μεγάλες ταχύτητες πρέπει να λάβουμε υπόψη μας τη μεταβολή της αδρανειακής μάζας. Δεν μάθαμε, λοιπόν, το δεύτερο νόμο άδικα.

Αλλά ήρθε και άλλο χτύπημα. Γύρω στα 1920 οι φυσικοί συνειδητοποίησαν ότι τα ατομικά σωμάτια μέσα στο άτομο και αργότερα και μέσα στο στερεό σώμα, δεν υπακούουν στον δεύτερο νόμο. Η εφαρμογή του οδήγησε σε λανθασμένα συμπεράσματα και αντιφάσεις με άλλους νόμους της φυσικής που δεν υπήρχε λόγος να αμφισβητούν. Οι κινήσεις των σωματίων δεν είναι δυνατόν να προβλεφθούν με τον τρόπο που προβλέπονται από τον θεμελιώδη νόμο σε οποιαδήποτε από τις μορφές του. Μόνο για την πιθανότητα να βρίσκεται το σωμάτιο σε κάποια περιοχή ή να έχει ταχύτητα ανάμεσα σε κάποια όρια, έχει νόημα να συζητάμε. Έτσι, για την κίνηση των σωματίων αυτών διατυπώθηκαν νόμοι διαφορετικοί.

Το βάρος και η μάζα

Ορισμένες τιμές μαζών (σε kg)

Ο Γαλαξίας μας	$2{,}2 \cdot 10^{41}$
Ο Ήλιος	$2 \cdot 10^{30}$
Η Γη	$6 \cdot 10^{24}$
Η Σελήνη	$7{,}4 \cdot 10^{22}$
Μάζα του νερού των ωκεανών	$1{,}4 \cdot 10^{21}$
Ένας ελέφαντας	$4{,}5 \cdot 10^{3}$
Ένας άνθρωπος	$7 \cdot 10^{1}$
Μια ρόγα σταφυλιού	$3 \cdot 10^{3}$
Ένας κόκκος σκόνης	$2{,}3 \cdot 10^{13}$
Ένα άτομο ουρανίου	$4 \cdot 10^{25}$
Ένα πρωτόνιο	$1{,}7 \cdot 10^{27}$
Ένα ηλεκτρόνιο	$9{,}1 \cdot 10^{31}$

Μέχρι τον 17ο αιώνα επικρατούσε η άποψη ότι το βάρος ενός σώματος είναι η φυσική τάση ενός σώματος να πέφτει στη Γη. Ο Νεύτων ήταν αυτός που ανέτρεψε την πανάρχαια αυτή άποψη για να υποστηρίξει ότι το βάρος ενός σώματος είναι μια ελκτική δύναμη την οποία ασκεί η Γη στο συγκεκριμένο σώμα. Σύμφωνα με τη νευτωνική δυναμική όλα τα αντικείμενα, από τα πιο βαριά μέχρι τα πιο ελαφριά, έχουν κάποιο βάρος με την έννοια ότι σε όλα η Γη ασκεί κάποια μικρή ή μεγάλη δύναμη.

Το διάνυσμα που παριστάνει το βάρος ενός σώματος διέρχεται από ένα ορισμένο σημείο το οποίο λέγεται κέντρο βάρους του σώματος. Κατά την ελεύθερη πτώση ενός σώματος το βάρος είναι η μοναδική δύναμη που ασκείται στο σώμα και είναι συνεπώς αυτή που προκαλεί τη βαρυτική επιτάχυνση g.

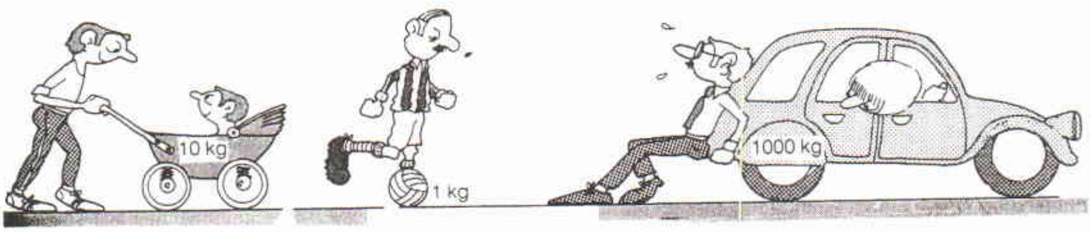
Σύμφωνα λοιπόν με τον δεύτερο νόμο της κίνησης ισχύει

$$\mathbf{B = mg}$$



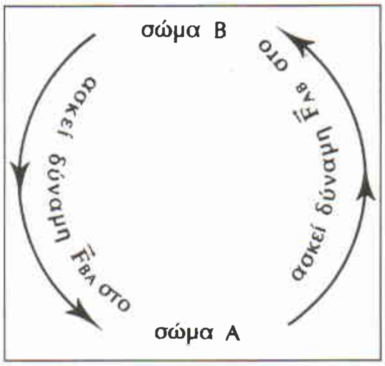
όπου το σύμβολο m παριστάνει τη μάζα του σώματος.

Είναι φανερό ότι για δύο σώματα με μάζες m_1 και m_2 και αντίστοιχα B_1 και B_1 ισχύει $m_2/m_1 = B_2/B_1$. Μπορούμε μ' άλλα λόγια, να μετρήσουμε μία μάζα, να βρούμε, δηλαδή, τον λόγο της προς μίαν άλλη (που θα αποτελεί τη μονάδα) από τον λόγο των δυο βαρών. Σε τελευταία ανάλυση μπορούμε να μετρήσουμε μία μάζα χρησιμοποιώντας τον ζυγό ή το δυναμόμετρο. Και αυτός θα είναι ένας τρόπος πολύ πιο βολικός από τον προηγούμενο, ο οποίος βασίστηκε στη μέτρηση της αδράνειας.



Ωστόσο, για τον προσδιορισμό της μάζας των ατομικών και των πυρηνικών σωματίων ο μόνος τρόπος είναι η μέθοδος της αδράνειας, που ουσιαστικά είναι «μέθοδος κλωτσιάς». Συγκεκριμένα μετράμε τη μεταβολή της ταχύτητας του σωματίου, που προκλήθηκε από γνωστή δύναμη, η οποία ενεργεί για γνωστό χρονικό διάστημα.

Ο τρίτος νόμος της κίνησης



Η αλληλεπίδραση ανάμεσα σε δύο σώματα Α και Β περιγράφεται με δύο δυνάμεις F_{AB} και F_{BA} οι οποίες σε κάθε χρονική στιγμή έχουν ί-σα μέτρα και αντίθετες κατευθύνσεις.

Μια ιδέα παράξενη

Μια βαριά σιδερένια μπίλια πέφτει με φόρα πάνω σε ένα σφαιρίδιο, σιδερένιο αλλά πολύ πιο ελαφρύ. Σύμφωνα με τη φυσική, η βαριά μπίλια ασκεί δύναμη στο σφαιρίδιο αλλά και το σφαιρίδιο ασκεί δύναμη στη μπίλια. Αν υποθέσουμε ότι μάς κάνουν την ερώτηση «*ποια από τις δύο αυτές δυνάμεις είναι μεγαλύτερη;*» θα θελήσουμε αυθόρμητα να απαντήσουμε ότι η δύναμη που ασκεί η βαριά μπίλια είναι σίγουρα πιο μεγάλη.

Καθώς ο μαγνήτης τραβάει την καρφίτσα, σύμφωνα με τη φυσική, τής ασκεί κάποια δύναμη και η καρφίτσα ασκεί ταυτόχρονα στο μαγνήτη κάποια δύναμη. Αν κάποιος μάς ρωτήσει «*ποια από τις δύο αυτές δυνάμεις είναι μεγαλύτερη;*» είμαστε έτοιμοι να υποστηρίξουμε ότι η δύναμη που ασκεί ο μαγνήτης στην καρφίτσα είναι μεγαλύτερη από την άλλη.

Και ενώ όλα αυτά μάς φαίνονται λογικά, η νευτωνική δυναμική υποστηρίζει ότι οι απαντήσεις μας δεν είναι σύμφωνες με τον λεγόμενο τρίτο νόμο της κίνησης ο οποίος εμπεριέχει μια ιδέα φαινομενικά παράξενη, ένα από τα «μυστικά» της έννοιας δύναμη. Ο τρίτος αυτός νευτωνικός νόμος της κίνησης μάς λέει συγκεκριμένα.

α) ότι η δύναμη την οποία ασκεί η βαριά μπίλια στο σφαιρίδιο έχει το ίδιο μέτρο με τη δύναμη που ασκεί το σφαιρίδιο στη μπίλια και ότι εκτός απ' αυτό

β) οι δύο δυνάμεις έχουν κατευθύνσεις αντίθετες.

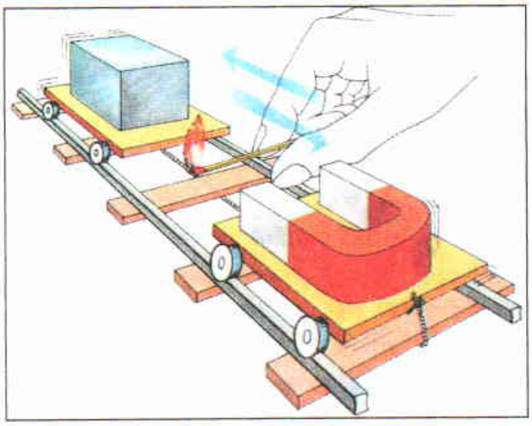
Το ίδιο ακριβώς ισχύει και στην περίπτωση της αλληλεπίδρασης του μαγνήτη με την καρφίτσα αλλά και σε οποιαδήποτε άλλη αλληλεπίδραση.

Μπορούμε να γράφουμε

$$F_{AB} = -F_{BA}$$

Η ουσία όμως και οι λεπτομέρειες που κρύβει η γενική αυτή

διατύπωση δεν μπορούν να φανούν παρά μόνο με κάποια ανάλυση καταστάσεων που συναντάμε στο εργαστήριο και στην καθημερινή ζωή.



Αν κάψουμε το νήμα που τα συνδέει, τα δύο βαγονάκια κινούνται το ένα προς το άλλο. Περιγράφουμε την αλληλεπίδραση του μαγνήτη με το σίδερο. Λέμε ότι ο μαγνήτης ασκεί δύναμη $\vec{F}_{\mu\sigma}$ στο σιδερένιο αντικείμενο. Τη δύναμη αυτή τη σημειώνουμε μόνο αν ενδιαφερθούμε να μελετήσουμε την κινητική κατάσταση του σίδερου. Ταυτόχρονα το σίδερο ασκεί δύναμη $\vec{F}_{\sigma\mu}$ ($\vec{F}_{\sigma\mu} = -\vec{F}_{\mu\sigma}$) στο μαγνήτη, την οποία δεν θα σημειώσουμε παρά μόνο αν θελήσουμε να μελετήσουμε την κινητική κατάσταση του μαγνήτη. Ο μαγνήτης θα αποτελεί το σώμα που μας ενδιαφέρει και το σίδερο θα ανήκει στο «περιβάλλον» του.

Στο εργαστήριο

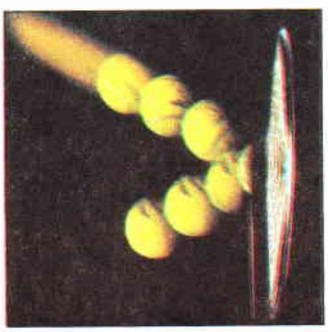
Καταφεύγουμε στο εργαστήριο. Εκεί βρίσκουμε δύο διαφορετικά δυναμόμετρα, το $Δ_1$ και το $Δ_2$, συνδέουμε τα άγκιστρά τους και ύστερα τα πιάνουμε από τους κρίκους και τα τεντώνουμε. Διαπιστώνουμε ότι αν και τα δυναμόμετρα είναι διαφορετικά οι ενδείξεις τους είναι ίδιες. Η δύναμη που ασκεί το $Δ_1$ στο $Δ_2$ εμφανίζεται να έχει το ίδιο μέτρο με τη δύναμη που ασκεί το $Δ_2$ στο $Δ_1$.

Τεχνολογία και τένις

Στην παρακάτω εξαιρετική χρονοφωτογραφία βλέπουμε ότι η μπάλα του τένις χτύπησε πάνω στο δίχτυ της ρακέτας και άλλαξε κατεύθυνση. Περιγράφουμε την αλληλεπίδραση της μπάλας με το δίχτυ. Η μπάλα ασκεί δύναμη $\vec{F}_{\mu\delta}$ στο δίχτυ. Το δίχτυ ασκεί δύναμη $\vec{F}_{\delta\mu}$ στην μπάλα έτσι ώστε $\vec{F}_{\mu\delta} = -\vec{F}_{\delta\mu}$. Αν θελήσουμε όμως να περιγράψουμε την αλλαγή της κινητικής κατάστασης της μπάλας, από τις δύο δυνάμεις θα σημειώσουμε μόνο εκείνη που ασκεί το δίχτυ στην μπάλα.

Παρατηρήσεις

Ας φωτίσουμε τώρα, κάπως περισσότερο, ορισμένες πλευρές του τρίτου νόμου της κίνησης.

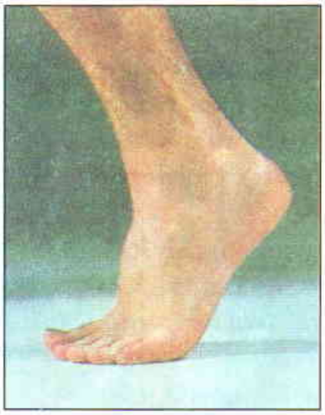


1. Οι δυο δυνάμεις που εμφανίζονται στην περιγραφή μιας αλληλεπίδρασης εξασκούνται σε δύο διαφορετικά σώματα. Εφόσον λοιπόν δεν εξασκούνται στο ίδιο σώμα, δεν πρέπει να μας δημιουργηθεί η εντύπωση ότι πρόκειται για δυνάμεις που αλληλοεξουδετερώνονται.
2. Ο τρίτος νόμος αναφέρεται σε κάποια ιδιότητα **όλων** των δυνάμεων. Ισχύει είτε για δυνάμεις επαφής (μπάλα-δίχτυ) είτε για δυνάμεις από απόσταση (μαγνήτης-σίδερο). Ισχύει ακόμα, κι αυτό να το προσέξουμε, *και* στις

περιπτώσεις όπου τα σώματα ισορροπούν αλλά *και* σε κείνες που επιταχύνονται.

3. Στη διατύπωση που κάνει ο Νεύτων, στα Principia, δεν περιέχεται ούτε ο όρος *δύναμη* ούτε κανένας μαθηματικός συμβολισμός. Για τις δύο δυνάμεις χρησιμοποιεί τις λέξεις **δράση** και **αντίδραση.**

Θα χρησιμοποιήσουμε την ορολογία αυτή για να ερμηνεύσουμε την εκκίνηση ενός δρομέα. Καθώς εκτινάσσεται, σπρώχνει με τα πόδια του τον βατήρα προς τα πίσω. Το σπρώξιμο συνοδεύεται από μια αντίθετη δύναμη, που ασκεί ο βατήρας στα πόδια του και τον «πετάει» προς τα μπρος. Αν η πρώτη δύναμη θεωρηθεί σαν δράση η άλλη θεωρείται αντίδρασή της.



4. Η δράση δεν είναι αίτιο της αντίδρασης όπως θα μπορούσε, ίσως, να νομίσει κανείς. Στην περίπτωση, για παράδειγμα, ενός ανθρώπου που βαδίζει, αν το έδαφος δεν ασκούσε δύναμη στο πέλμα του, ούτε κι αυτό θα μπορούσε να ασκήσει δύναμη στο έδαφος και το βάδισμα, θα ήταν αδύνατο.

Η δράση και η αντίδραση συνυπάρχουν. Ο τρίτος νόμος της κίνησης λέγεται και *νόμος δράσης αντίδρασης.*

Νόμοι των δυνάμεων

Οι νευτωνικοί νόμοι της κίνησης είναι αναγκαίοι για τη μελέτη της κίνησης αλλά δεν επαρκούν. Αν θέλουμε να έχουμε ένα ολοκληρωμένο σχέδιο για τη μελέτη της κίνησης, θα χρειαστεί να απαντήσουμε και σε άλλου είδους ερωτήματα.

Πώς ασκούνται οι διαφορές δυνάμεις; Από τι εξαρτάται η τιμή τους;

Να αναζητήσουμε δηλαδή, νόμους δυνάμεων. Τέτοιοι νόμοι, είναι για παράδειγμα, οι νόμοι των τριβών, ο νόμος της παγκόσμιας έλξης, ο νόμος Coulomb για τα ηλεκτρικά φορτία. Ο νόμος Hooke επίσης. Οι νόμοι της κίνησης μαζί με τους νόμους των δυνάμεων αποτελούν το περιεχόμενο της επιστήμης της Δυναμικής.



Το λουρί ασκεί δύναμη στο περιλαίμιο του σκύλου στο σημείο που έχει προσδεθεί. Το διάνυσμα που την παριστάνει έχει κατεύθυνση προς το μέρος του λουριού. Το ίδιο λουρί ασκεί δύναμη στο χέρι του ανθρώπου. Μπορείτε να τις σχεδιάσετε;

Είδαμε ότι ο πλανήτης Γη ασκεί δύναμη σε κάθε αντικείμενο χωρίς απαραίτητα να το αγγίζει. Η δύναμη βάρος είναι μία δύναμη που ασκείται από απόσταση.

Τις δυνάμεις είναι βολικό να τις διακρίνουμε σε δυνάμεις επαφής και σε δυνάμεις από απόσταση. Χαρακτηριστικό παράδειγμα δύναμης επαφής είναι η δύναμη που ασκεί ένα τεντωμένο νήμα σε ένα σώμα στο οποίο έχει προσδεθεί. Το νήμα, που μπορεί να είναι σπάγγος, κορδόνι, σκοινί, κλωστή, λουρί, καθώς τεντώνεται, πάντα «τραβάει» ασκεί, δηλαδή, δύναμη με κατεύθυνση προς το μέρος του.

Δυνάμεις επαφής είναι, επίσης, η δύναμη του ελατηρίου, η κάθετη δύναμη στήριξης, η τριβή, η μυϊκή δύναμη του ανθρώπου, η άνωση και άλλες.

Δυνάμεις από απόσταση είναι η δύναμη ανάμεσα σε ηλεκτρικά φορτία, ανάμεσα σε μαγνήτες και η δύναμη βάρος.

Οι *δυνάμεις επαφής* είναι έννοιες που χρησιμοποιούμε για να ερμηνεύσουμε και να προβλέψουμε φαινόμενα του Μακρόκοσμου. Από τη σκοπιά όμως, του Μικρόκοσμου όλες οι δυνάμεις είναι, σε τελευταία ανάλυση, δυνάμεις από απόσταση. Σήμερα πιστεύουμε ότι τα διάφορα σώματα στο σύμπαν αλληλεπιδρούν μεταξύ τους με τεσσάρων ειδών τρόπους. Μπορούμε να διακρίνουμε την ισχυρή, την ηλεκτρομαγνητική, την ασθενή και τη βαρυτική αλληλεπίδραση.



Μία δύναμη που στηρίζει

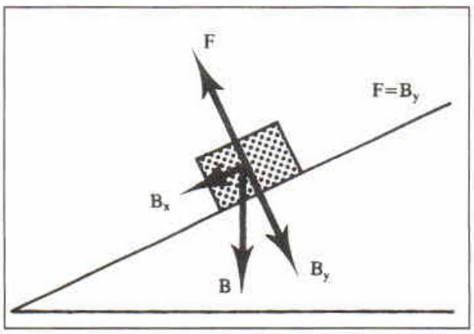
Κάθεσαι στο γραφείο σου. Δίπλα είναι ένα άδειο ποτήρι νερού. Αναρωτιέσαι *τι δυνάμεις* ασκούνται στο ποτήρι.

Είναι γνωστό ότι μία τουλάχιστον δύναμη υπάρχει. Το βάρος, η ελκτική δηλαδή δύναμη που ασκεί η Γη στο ποτήρι. Η δράση της, όμως, δεν εκδηλώνεται. Το ποτήρι μένει ακίνητο. Η πτώση του εμποδίζεται από την επιφάνεια του τραπεζιού. Σύμφωνα λοιπόν και με τον πρώτο νόμο της κίνησης πρέπει να δεχτούμε ότι, εκτός από το βάρος, υπάρχει μία ακόμα δύναμη, με αντίθετη κατεύθυνση, η οποία ασκείται στο ποτήρι από τη στερεά επιφάνεια του τραπεζιού και ο ρόλος της δεν είναι να προκαλεί κάποια επιτάχυνση, αλλά να εξουδετερώνει την επιτάχυνση που θα εκδηλωνόταν αν δεν υπήρχε αυτή.

Μπορούμε να τη λέμε *δύναμη στήριξης*. Είναι μία δύναμη επαφής που συνηθίζεται να αναφέρεται και σαν *κάθετη αντίδραση* επειδή αποτελεί ένα είδος απάντησης της στερεάς επιφάνειας στο ποτήρι από το οποίο πιέζεται. Παριστάνεται με ένα διάνυσμα κάθετο στην κοινή επιφάνεια με κατεύθυνση προς το μέρος του σώματος, στο οποίο ασκείται.

Έχει σχέση με τις ελαστικές παραμορφώσεις που εμφανίζουν τα σώματα, όταν βρίσκονται σε επαφή και αλληλοσυμπιέζονται, δεδομένου ότι κανένα σώμα δεν είναι απόλυτα ασυμπίεστο. Στην περίπτωση οριζόντιας στερεάς επιφάνειας η τιμή της είναι ίση με το βάρος του σώματος. Αν στη θέση του ποτηριού υπήρχε ένα βαρύ σιδερένιο κουτί, η δύναμη στήριξης θα ήταν μεγαλύτερη και ακόμα πιο μεγάλη θα ήταν αν ανέβαινε πάνω ένας άνθρωπος. Κάθε φορά, δηλαδή, η τιμή της δύναμης στήριξης έχει μέτρο όσο το βάρος του σώματος κι αυτό θα ισχύει μέχρι να σπάσει το ξύλο του τραπεζιού.

Αν η επιφάνεια δεν είναι οριζόντια η δύναμη στήριξης θα εξουδετερώνει τη μία συνιστώσα του βάρους εφόσον, εννοείται, δεν υπάρχουν άλλες δυνάμεις.



Η τριβή

Στην καθημερινή μας ζωή η λέξη *τριβή* κάνει συχνά την εμφάνισή της έχοντας πάντα ένα συγκεκριμένο νόημα. Καθώς τρίβουμε τα χέρια για να ζεσταθούμε αλλά και καθώς ο οδηγός φρενάρει

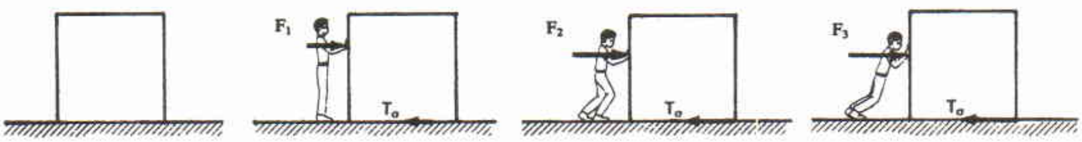
για να σταματήσει το αυτοκίνητο, λέμε ότι υπάρχει τριβή. Σ' αυτήν χρεώνουμε και τις φθορές που παρουσιάζουν τα κινητά τμήματα των μηχανών γι' αυτό και πρέπει να αλλάζουμε κάθε τόσο τα λάδια της μοτοσικλέτας μας. Η εμπειρία μάς διδάσκει ότι τα λάδια φαίνεται να την περιορίζουν. Μέχρι και την κλειδαριά της πόρτας μας θα χρειαστεί κάποτε να τη λαδώσουμε για να μπορεί να γυρίζει το κλειδί.

Στη γλώσσα της φυσικής τα πράγματα είναι λίγο διαφορετικά. Ο όρος *τριβή* αναφέρεται σε δύο δυνάμεις. Η μία από αυτές λέγεται *τριβή ολίσθησης* και εμφανίζεται όταν τα αντικείμενα τρίβονται μεταξύ τους. Όλα τα παραπάνω φαινόμενα σχετίζονται με την τριβή ολίσθησης. Η άλλη λέγεται *στατική τριβή και δεν έχει σχέση με σώματα που τρίβονται.* Είναι μάλιστα δύναμη που δεν επιτρέπει στα αντικείμενα να γλιστρούν και να τρίβονται. Χάρη σ' αυτήν μπορούμε να κρατάμε ένα μπουκάλι χωρίς να γλιστρά από το χέρι μας και να συγκρατούμε τη μπάλα του μπάσκετ πιάνοντας την από την πάνω μεριά. Η παρουσία της αποτελεί, επίσης, βασική προϋπόθεση ώστε η σόλα του παπουτσιού μας να «γατζώνεται» στο οδόστρωμα για να μην γλιστράμε και να βαδίζουμε.

Τόσο η τριβή ολίσθησης όσο και η στατική τριβή υπάρχουν μόνο εφόσον υπάρχει κάθετη δύναμη στήριξης. Θα μελετήσουμε πρώτα τη στατική τριβή.

Η στατική τριβή εμφανίζεται στις επιφάνειες δύο αντικειμένων, τα οποία αλληλοσυμπιέζονται ενώ βρίσκονται σε σχετική ισορροπία.

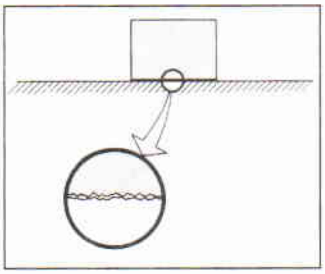
Σ' ένα κατάστημα που πουλάει μουσικά όργανα υπάρχει ένα βαρύ γερμανικό πιάνο. Οι δυνάμεις που ασκούνται πάνω του είναι το βάρος και η κατακόρυφη δύναμη στήριξης. Ο καταστηματάρχης ζητάει από τον υπάλληλο να το μετακινήσει λίγο πιο πέρα. Ο υπάλληλος πηγαίνει δίπλα στο πιάνο, το σπρώχνει, αλλά δεν τα καταφέρνει.



Στις δυνάμεις που ασκούνται στο πιάνο πρέπει τώρα να προστεθεί και η οριζόντια δύναμη μέτρου F_1, με την οποία το σπρώχνει ο υπάλληλος. Εφόσον όμως το πιάνο μένει ακίνητο, χρειάζεται να θεωρήσουμε και μια δύναμη με αντίθετη κατεύθυνση, για να μπορέσουμε να δικαιολογήσουμε την ισορροπία. Η δύναμη αυτή είναι η

στατική τριβή. Ασκείται από το έδαφος, στο σώμα, όπως και η κάθετη δύναμη στήριξης. Εκφράζει το γεγονός ότι το όχι λείο έδαφος παρεμποδίζει το σώμα να μετακινηθεί σε σχέση μ' αυτό. Εννοείται ότι το μέτρο της στατικής τριβής είναι ίσο με το μέτρο της F_1.

Τώρα ο υπάλληλος στηρίζεται καλύτερα στο έδαφος και επιχειρεί ξανά με μεγαλύτερη δύναμη μέτρου F_2, αλλά το πιάνο δε λέει να κινηθεί. Η στατική τριβή είναι τώρα μεγαλύτερη από πριν, έχει δηλαδή μέτρο ίσο με F_2. Ο υπάλληλος αυξάνει τη δύναμη ολοένα περισσότερο F_3, F_4, F_5. Όσο το πιάνο εξακολουθεί να παραμένει ακίνητο, η στατική τριβή, κάθε φορά, έχει μέτρο όσο και η αντίθετη οριζόντια δύναμη. Σε κάποια στιγμή που το μέτρο της οριζόντιας δύναμης γίνεται F, το βαρύ πιάνο επιτέλους μετακινείται. Αυτό για μας σημαίνει ότι το έδαφος δεν έχει παραπέρα περιθώρια να συγκρατήσει το σώμα, το οποίο αρχίζει να ολισθαίνει. Υπάρχει δηλαδή κάποιο «μέγιστο» στην τιμή της στατικής τριβής που ασκεί μια επιφάνεια σε μια άλλη.



Παρολο που μπορεί να μην είναι αντιληπτές με γυμνό μάτι, οι ανωμαλίες των δυο επιφανειών κάνουν το έδαφος να «γαντζώνει» το βαρύ αντικείμενο και αυτό ακριβώς το γάντζωμα αποδίδεται με τη στατική τριβή.

Μια προσεκτική πειραματική διαδικασία μπορεί να δείξει ότι το μέγιστο της στατικής τριβής δεν εξαρτάται από το εμβαδόν της κοινής επιφάνειας επαφής. Εξαρτάται μόνο από τη φύση των δυο επιφανειών και είναι ανάλογο προς το μέτρο της κάθετης δύναμης στήριξης. Αυτό εκφράζεται με τη σχέση

$$T_{\sigma,\,max} = \mu_\sigma F_\kappa$$

όπου $T_{\sigma,\,max}$ η μέγιστη τιμή της στατικής τριβής, F_κ το μέτρο της κάθετης δύναμης στήριξης και μ_σ είναι ένας καθαρός αριθμός, ο συντελεστής στατικής τριβής, που εκφράζει την επίδραση της φύσης των δυο επιφανειών στο να διαμορφωθεί το μέτρο της μέγιστης στατικής τριβής.

- Εφόσον υπάρχει σχετική ισορροπία, η τιμή T_σ της στατικής τριβής μπορεί να είναι οποιαδήποτε μέσα στην περιοχή $0 \leq T_\sigma \leq \mu_\sigma F_\kappa$
- Τη στιγμή που επίκειται ολίσθηση η στατική τριβή έχει πάρει τη μεγαλύτερη τιμή της, που είναι ίση με το γινόμενο $\mu_\sigma F_k$.

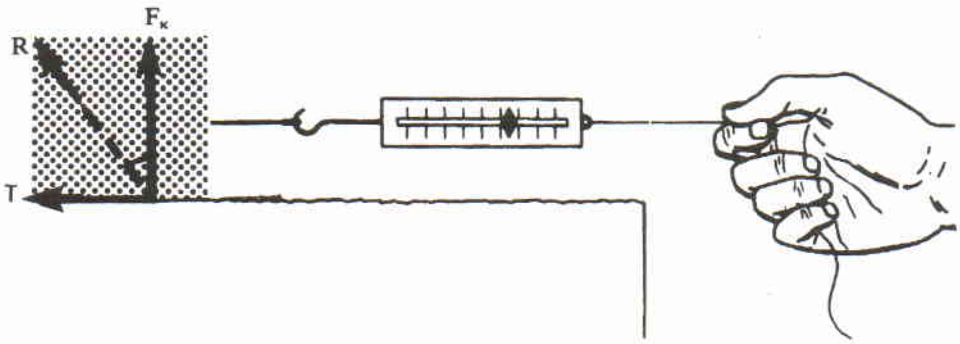
Αν θελήσουμε να δούμε το ζήτημα γενικότερα θα χρειαστεί να πούμε ότι η στατική τριβή έχει τέτοια τιμή και τέτοια κατεύθυνση ώστε, σε κάθε περίπτωση, να ισχύουν οι φυσικοί νόμοι.

Η τριβή ολίσθησης εμφανίζεται κατά την επαφή δύο αντικειμένων τα οποία αλληλοσυμπιέζονται ενώ το ένα ολισθαίνει ως προς το άλλο.

Η τριβή ολίσθησης που ασκείται σε ένα σώμα Σ_1 από ένα άλλο Σ_2, έ-

χει φορά αντίθετη προς τη σχετική ταχύτητά του $Σ_1$ ως προς το $Σ_2$. Το μέτρο της μπορεί να καθοριστεί πειραματικά από το μέτρο της αντίθετης (προς αυτήν) δύναμης (F) που θα πρέπει να ασκείται για να ολισθαίνει το σώμα οριζόντια με σταθερή ταχύτητα. Στο προηγούμενο πείραμα με το φλιτζάνι μπορούμε να «διαβάζουμε» πάνω στο δυναμόμετρο την τιμή της (F), οπότε θα ξέρουμε και το μέτρο της τριβής ολίσθησης, αρκεί να είμαστε βέβαιοι ότι το φλιτζάνι κινείται με σταθερή ταχύτητα. Αν δουλέψουμε πάνω σ' αυτό το ζήτημα θα μπορέσουμε να ανακαλύψουμε μόνοι μας τους νόμους της τριβής ολίσθησης. Οι νόμοι αυτοί είναι αρκετά προσεγγιστικοί στις προβλέψεις τους. Πρωτοδιατυπώθηκαν από τον Leonardo da Vinci δύο περίπου αιώνες προτού η έννοια της δύναμης αποσαφηνιστεί από τον Νεύτωνα. Το 18ο αιώνα ο Charles Coulomb επαλήθευσε τους ίδιους νόμους με ακριβέστερα πειράματα και έκανε σαφή τη διάκριση ανάμεσα στη στατική τριβή και την τριβή ολίσθησης.

Οι εμπειρικοί νόμοι της τριβής ολίσθησης διατυπώνονται με



τέσσερις προτάσεις. Οι δύο από αυτές μάς λένε *από τι εξαρτάται* και οι άλλες δύο *από τι δεν εξαρτάται* το μέτρο της.

Η τριβή ολίσθησης

Είναι ανεξάρτητη του εμβαδού συνεπαφής.

Είναι ανεξάρτητη της σχετικής ταχύτητας των σωμάτων.

Εξαρτάται από τη φύση των επιφανειών επαφής.

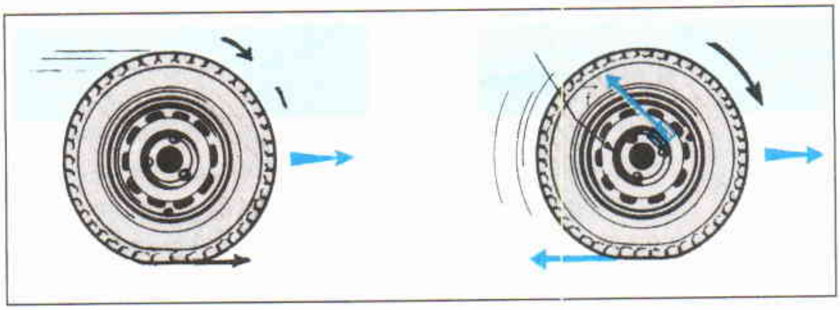
Είναι ανάλογη της κάθετης αντίδρασης.

Όλα αυτά, μπορούν να εκφραστούν με τη σχέση

$$\mathbf{T = \mu F_k}$$

όπου μ ο λεγόμενος συντελεστής τριβής ολίσθησης ο οποίος εξαρ-

τάται από τη φύση των δύο επιφανειών επαφής. Για κάθε δυάδα επιφανειών τα πειράματα δείχνουν ότι ο συντελεστής τριβής ολίσθησης μ είναι λίγο μικρότερος από τον συντελεστή στατικής τριβής $μ_σ$.



Ας δούμε πως κινούνται και πως σταματούν τα αυτοκίνητα οχήματα.

Η κίνηση από τη μηχανή μεταδίδεται στους κινητήριους τροχούς, οι οποίοι έτσι περιστρέφονται. Την περιστροφή αυτή τείνει να εμποδίσει η στατική τριβή, που ασκείται από το έδαφος στον τροχό στην περιοχή επαφής. Η δύναμη $T_σ$ επιταχύνει το όχημα.

Στο σταμάτημα οι σιαγόνες των φρένων εμποδίζουν την περιστροφή του τροχού γύρω από τον άξονά του και ο τροχός τείνει να γλιστρήσει κατά τη φορά της κίνησης. Την ολίσθηση αυτή εμποδίζει η τριβή από το έδαφος.

Συντελεστές στατικής τριβής ($μ_σ$) και τριβής ολίσθησης (μ)

Επιφάνειες	$μ_σ$	μ
Ελαστικό σε μπετόν	0,6-1,0	0,8
Ατσάλι σε ατσάλι	0,74	0,57
Αλουμίνιο σε ατσάλι	0,61	0,47
Γυαλί σε γυαλί	0,94	0,4
Ξύλο σε ξύλο	0,24-0,5	
Πέδιλο σκι σε ξερό χιόνι		0,1
Τεφλόν σε τεφλόν	0,04	0,04
Γρασαρισμένα μέταλα	0,1	0,06

Δυναμική στην κυκλική κίνηση

Η θεωρητική σκέψη

Πριν προχωρήσουμε στη μελέτη ενός ακόμα από τους νόμους των δυνάμεων –του νόμου της παγκόσμιας έλξης– είναι αναγκαίο να σταθούμε και να ασχοληθούμε με την εφαρμογή του δεύτερου νόμου της κίνησης στο φαινόμενο *ομαλή κυκλική κίνηση*.

Θα χρειαστεί να θυμίσουμε ότι η ομαλή κυκλική είναι μια κίνηση με επιτάχυνση. Το μέτρο της ταχύτητας διατηρείται βέβαια αναλλοίωτο αλλά η κατεύθυνση της αδιάκοπα μεταβάλλεται. Επιτάχυνση της κίνησης είναι η κεντρομόλος επιτάχυνση που παραμένει συνεχώς κάθετη στην ταχύτητα με κατεύθυνση προς το κέντρο της κυκλικής τροχιάς.



Σύμφωνα λοιπόν με το δεύτερο νόμο της κίνησης *η συνισταμένη όλων των δυνάμεων που ασκούνται στο κινούμενο αντικείμενο θα έχει πάντα κατεύθυνση προς το κέντρο της τροχιάς και το μέτρο της θα είναι ίσο με το γινόμενο της μάζας του επί την κεντρομόλο επιτάχυνσή του.*

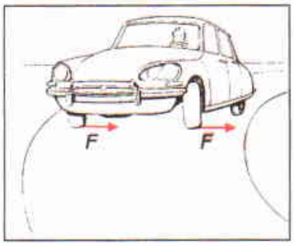
Είναι γνωστό ότι για την κεντρομόλο επιτάχυνση ισχύει $\alpha = \upsilon^2/R$, όπου υ η ταχύτητα του αντικειμένου και R η ακτίνα της κυκλικής τροχιάς. Κατά την ομαλή κυκλική κίνηση η θεμελιώδης εξίσωση $F = m\alpha$ παίρνει, συνεπώς, τη μορφή

$$F = \frac{m\upsilon^2}{R}$$

Το σύμβολο F θα παριστάνει τη συνισταμένη των ασκουμένων δυνάμεων για την οποία χρησιμοποιείται ο όρος **κεντρομόλος δύναμη** χωρίς αυτό να είναι απαραίτητο. Αν θελήσουμε να χρησιμοποιήσουμε αυτόν τον όρο θα πρέπει να προσέξουμε ότι η *κεντρομόλος δύναμη* δεν είναι άλλη από τη συνισταμένη όλων των δυνάμεων.

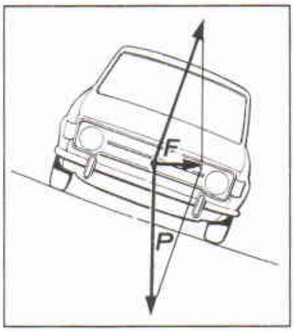
Όταν ένα αντικείμενο εκτελεί ομαλή κυκλική κίνηση η συνισταμένη όλων των δυνάμεων που ασκούνται σ' αυτό έχει πάντοτε κατεύθυνση προς το κέντρο της τροχιάς, μέτρο ίσο με το γινόμενο της μάζας επί την κεντρομόλο επιτάχυνση και χαρακτηρίζεται κεντρομόλος δύναμη.

Αντιστρέφοντας το πρόβλημα, μπορούμε να πούμε ότι *για να εκτελέσει* ένα σώμα ομαλή κυκλική κίνηση, θα πρέπει να εμφανιστεί σε ένα περιβάλλον το οποίο θα έχει τη δυνατότητα να του ασκεί συνεχώς συνισταμένη δύναμη σταθερού μέτρου, η οποία ως διάνυσμα θα βρίσκεται στο ίδιο πάντα επίπεδο, με κατεύθυνση συνεχώς κάθετη στην εκάστοτε ταχύτητα. Φυσικά το μέτρο της θα συνδέεται με τα άλλα μεγέθη με την παραπάνω εξίσωση.



Στην καθημερινή ζωή

Κατά τη στροφή στο οριζόντιο οδόστρωμα, οι στατικές τριβές, που ασκούνται από την άσφαλτο στα λάστιχα, δημιουργούν την αναγκαία συνισταμένη δύναμη για να μπορέσει να πραγματοποιηθεί η στροφή.



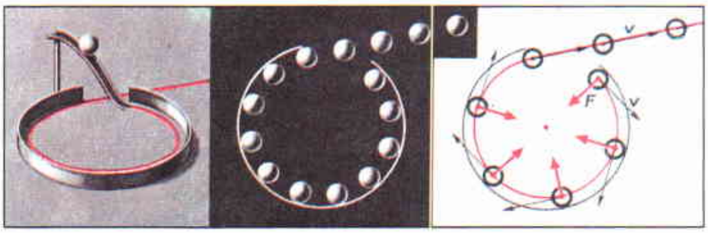
Καθώς το αυτοκίνητο παίρνει τη στροφή σε υπερυψωμένο οδόστρωμα, η αναγκαία *κεντρομόλος* δύναμη μπορεί να δημιουργηθεί από τη σύνθεση του βάρους και της κάθετης αντίδρασης.

Και επειδή στη ζωή δεν υπάρχουν μόνο αυτοκίνητα, κάθε γλάρος, που ζυγιάζεται κι ετοιμάζεται να πάρει στροφή, έχει μια τέτοια αλληλεπίδραση, με το περιβάλλον του, η οποία του εξασφαλίζει την αναγκαία *κεντρομόλο* δύναμη.

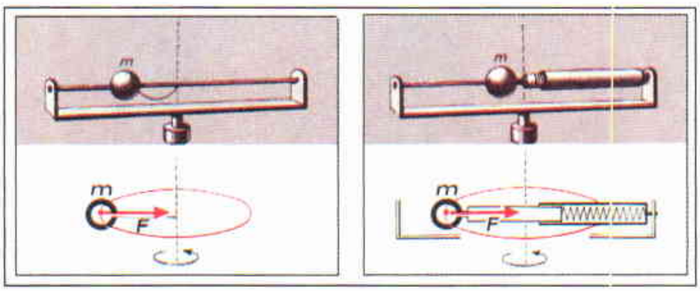
Στο εργαστήριο

Τα συμπεράσματα στα οποία καταλήγει η θεωρία (εφαρμογή του θεμελιώδους νόμου της δυναμικής στο φαινόμενο ομαλή κυκλική κίνηση) εναρμονίζονται με συμπεράσματα της πειραματικής έρευνας.

Η μπίλια θα εκτελεί ομαλή κυκλική κίνηση εφόσον θα υπάρχουν οι αναγκαίες προϋποθέσεις. Όταν αυτές πάψουν να υφίστανται, η μπίλια θα «αρνηθεί» να συνεχίσει αυτή την κίνηση.



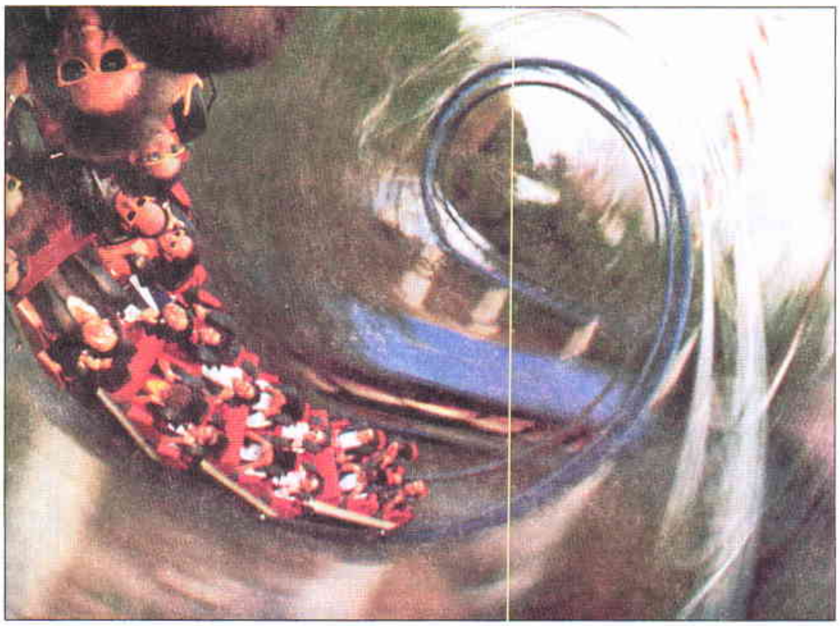
Καθώς περιστρέφεται η διάταξη το νήμα τεντώνεται. Η δύναμη, που ασκεί το τεντωμένο νήμα στη σφαίρα, παίζει το ρόλο κεντρομόλου δύναμης.



Σ' αυτή τη διάταξη η κεντρομόλος δύναμη μπορεί να μετρηθεί απ' ευθείας με το δυναμόμετρο.

Αλγεβρικές εξισώσεις

Η θεμελιώδης εξίσωση της δυναμικής είναι η $\vec{F} = m\vec{\alpha}$. Αν η κίνηση την οποία θέλουμε να μελετήσουμε είναι ομαλή κυκλική, από τη διανυσματική αυτή εξίσωση μπορούμε να πάρουμε τις αλγεβρικές εξισώσεις $\Sigma F_R = m\alpha_\kappa$ $\Sigma F_y = 0$, αρκεί ο άξονας R να έχει την κατεύθυνση της ακτίνας και ο y να είναι κάθετος στον προηγούμενο και να βρίσκεται στο επίπεδο των ασκουμένων δυνάμεων. Το ΣF_R παριστάνει το άθροισμα των αλγεβρικών τιμών των συνιστωσών όλων των δυνάμεων κατά τον άξονα R, ενώ το ΣF_y το αντίστοιχο άθροισμα κατά τον άξονα y.



Η Παγκόσμια έλξη

Και όμως κινείται

Η μεσαιωνική σκέψη βασιζόταν σε ένα στέρεο έδαφος από βεβαιότητες. Για κάθε πρόβλημα υπήρχε μία και μοναδική απάντηση. Μία ύστατη αλήθεια καθορισμένη και αμετακίνητη. Την αλήθεια για τη θρησκεία την περιείχαν οι Γραφές, την αλήθεια για τη Γεωμετρία ο Ευκλείδης, ενώ το έργο του Αριστοτέλη περιείχε την αλήθεια για τη Φυσική. Μία από τις αναντίρρητες αλήθειες της εποχής ήταν και η ιδέα ότι η Γη είναι το ακίνητο κέντρο ενός σύμπαντος, που είχε δημιουργηθεί γι' αυτήν.

Ο Nicolas Copernicus (Κοπέρνικος) ήταν ένας Πολωνός κληρικός γεννημένος το έτος 1473. Σε όλη του τη ζωή έγραψε ένα μόνο επιστημονικό έργο το οποίο δημοσιεύτηκε λίγο πριν πεθάνει, το έτος, δηλαδή, 1543. Στο έργο του αυτό ισχυριζόταν ότι η Γη δεν είναι το κέντρο του σύμπαντος, αλλά ένας πλανήτης που κινείται γύρω από τον Ήλιο, ενώ ταυτόχρονα στρέφεται μαζί με τα νερά και την ατμόσφαιρα γύρω από έναν άξονα με φορά από τη Δύση προς την Ανατολή. Αυτό που νομίζουμε για ημερήσια περιφορά του ουράνιου στερεώματος δεν προέρχεται από την κίνηση του ουρανού αλλά από την κίνηση της Γης.



«Ο θάνατος του Κοπέρνικου» Πίνακας του Ν. Lesser.



Χειρόγραφο του Κοπέρνικου από το μοναδικό βιβλίο του «Για τις περιστροφές των ουρανίων σφαιρών».

Μια σχετική άποψη είχε υποστηριχτεί από ένα μεγάλο αστρονόμο της αρχαιότητας, τον Αρίσταρχο τον Σάμιο, αλλά είχε ουσιαστικά αγνοηθεί. Δύο χιλιάδες χρόνια αργότερα, στον αιώνα του Κοπέρνικου, η ιδέα εξακολουθούσε να δείχνει όχι μόνο παράλογη αλλά και ενοχλητική.

Οι άνθρωποι του αιώνα αδιαφόρησαν. Η Καθολική Εκκλησία δεν θέλησε αμέσως να μελετήσει σε βάθος τις συνέπειες της θεωρίας αυτής. Αλλά στα 1616, πολλά χρόνια μετά το θάνατο του Κοπέρνικου, με μία ξαφνική βιασύνη περιέλαβε το βιβλίο στον κατάλογο (Index) των βιβλίων που απαγορευόταν να διαβάζουν οι άνθρωποι γιατί έρχονταν σε αντίθεση με τις Γραφές. Στη Βίβλο ο Ιησούς του Ναυή δεν σταμάτησε τη Γη αλλά τον Ήλιο και η Βίβλος δεν είναι δυνατόν να έχει άδικο. Οι Διαμαρτυρόμενοι υπήρξαν ακόμα πιο αποφασιστικοί. Ο Λούθηρος με φλογερούς λόγους καταδίκασε τον Πολωνό που ήθελε να ανατρέψει ολόκληρο το αστρονομικό σύστημα.

Ύστερα όμως από μερικές δεκαετίες οι υποστηρικτές της Κοπερνίκειας θεωρίας άρχισαν να πληθαίνουν. Ο Τζορντάνο Μπρούνο, ο Γιόχαν Κέπλερ και ο Γαλιλαίος υπήρξαν οι πιο μαχητικοί. Με ένα βιβλίο του που δημοσιεύτηκε στα 1632 ο Γαλιλαίος, βαθιά διαποτισμένος από τη θεωρία του Κοπέρνικου, κατάφερε να γελοιοποιήσει το παλιό γεωκεντρικό μοντέλο και να προκαλέσει κατ' ευθείαν το κύρος του καθολικισμού. Η πρόκληση αυτή υπήρξε η αιτία της ιστορικής δίκης του. Στην εποχή μας είναι δύσκολο να εξηγήσει κανείς πώς μια ακαδημαϊκού χαρακτήρα άποψη για την κίνηση της Γης θα μπορούσε να δημιουργήσει μια τέτοια κατάσταση.

Εάν όμως έμενε χωρίς απάντηση μια οποιαδήποτε επίθεση ενάντια στις βεβαιότητες εκείνες που αποτελούσαν θεμέλια ενός ολόκληρου οικοδομήματος, τι θα μπορούσε να συμβεί στη συνέχεια; Η δίκη έγινε μέσα σε κλίμα υποστήριξης του καθολικισμού. Ο Γαλιλαίος καταδικάστηκε και αναγκάστηκε να κάνει την περίφημη αποκήρυξη ότι η Γη δεν κινείται.

Τρισήμισυ αιώνες αργότερα.

Στη Νέα Υόρκη, στο κτίριο όπου εδρεύει ο Οργανισμός Ηνωμένων Εθνών, υπάρχει μια επιχρυσωμένη σφαίρα, κρεμασμένη με ανοξείδωτο χαλύβδινο σύρμα από την οροφή, σε τρόπο ώστε να της επιτρέπεται να αιωρείται ελεύθερα πάνω σε οποιοδήποτε κα-

τακόρυφο επίπεδο. Η σφαίρα αιωρείται συνεχώς, σαν εκκρεμές. Το εντυπωσιακό είναι ότι το κατακόρυφο επίπεδο αιωρήσεώς της στρέφεται αργά κατά τη φορά των δεικτών του ρολογιού, διαγράφοντας έναν πλήρη κύκλο μέσα σε 36 ώρες και 45 λεπτά. Η διάταξη αυτή σχετίζεται με την ευφυέστατη πειραματική απόδειξη για την περιστροφή της Γης, την οποία επινόησε ο Leon Foucault (Λεόν Φουκό) το 1851. Το σύστημα εγκαταστημένο στην έδρα του ΟΗΕ θυμίζει στους ανθρώπους ότι ζουν σ' έναν πλανήτη που περιστρέφεται αδιάκοπα.

Στη γλώσσα της φυσικής **ο Κοπέρνικος μας έδωσε ένα καινούριο σύστημα αναφοράς –τον Ήλιο–** διαφορετικό από αυτό που χρησιμοποιούσαμε προηγουμένως –τη Γη–. Εννοείται ότι μπορούμε, όποτε θέλουμε, να θεωρούμε τον πλανήτη μας σαν σύστημα αναφοράς, να μελετάμε οποιαδήποτε κίνηση σε σχέση με αυτόν και βέβαια να εξακολουθούμε να λέμε ότι ο ήλιος ανατέλλει, ανεβαίνει, μεσουρανεί και το δειλινό γέρνει και βασιλεύει στον ορίζοντα. Αν όμως θέλουμε να μελετήσουμε τις κινήσεις των πλανητών, ένα σύστημα αναφοράς που θα θεωρεί τον Ήλιο ακίνητο, οπωσδήποτε προσφέρεται περισσότερο.

Η ιερή κυκλική κίνηση δεν είναι κυκλική

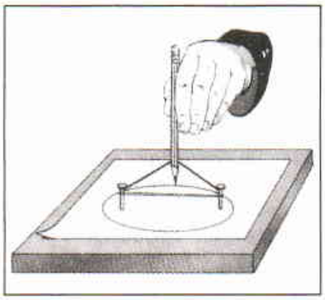


Ο Γερμανός Johann Kepler γεννήθηκε στα 1571 και έζησε μέχρι το 1630. Ένας σημαντικός βιογράφος του αναφέρει ότι «ήταν ένα μυαλό που έβρισκε την ουσία της θρησκείας, της αλήθειας και της ομορφιάς στη γλώσσα των αριθμών».

Στον δρόμο που είχε ανοιχτεί και οδηγούσε στην καινούρια Νευτωνική σύνθεση, αποφασιστικός ήταν και ο ρόλος του Γιόχαν Κέπλερ. Οι νόμοι του για τις κινήσεις των πλανητών ήταν οι πρώτοι φυσικοί νόμοι με τη σύγχρονη έννοια. Ακριβείς επαληθεύσιμες προτάσεις εκφρασμένες σε γλώσσα μαθηματική αποτελούσαν την πρώτη προσπάθεια σύνθεσης της αστρονομίας με τη φυσική, που στα προηγούμενα δύο χιλιάδες χρόνια είχαν προχωρήσει σε δρόμους διαφορετικούς. Ο Κέπλερ υπήρξε ο πρώτος αστρονόμος που ασπάστηκε την ηλιοκεντρική θεωρία του Κοπέρνικου. Στα πλαίσια της ηλιοκεντρικής αυτής θεωρίας των τέλειων τροχιών εργάστηκε σκληρά πάνω σε ήδη συγκεντρωμένο άφθονο υλικό αστρονομικών παρατηρήσεων.

Ύστερα από έξι χρόνια επεξεργασίας αυτού του υλικού ο Κέπλερ κατάλαβε ότι σοβαρά ερωτηματικά θα έμεναν αναπάντητα, εφόσον θα δεχόταν να παραμένει εγκλωβισμένος μέσα στο

δόγμα της τέλειας κυκλικής κίνησης των ουράνιων σωμάτων. Ήταν ο πρώτος ερευνητής που «κατάλαβε» ότι η ιερή κυκλική κίνηση δεν ήταν κυκλική και εισήγαγε την ιδέα ότι είχε σχήμα έλλειψης.



Στο σχήμα φαίνεται καθαρά με ποιο τρόπο μπορούμε να σχεδιάσουμε μια έλλειψη. Τα σημεία όπου βρίσκονται τα δύο καρφιά αποτελούν τις δύο εστίες της.

Υποστήριξε ότι όλοι οι πλανήτες περιφέρονται γύρω από τον ήλιο σε επίπεδες τροχιές. Κάθε τροχιά έχει το σχήμα μιας έλλειψης στη μία εστία της οποίας βρίσκεται ο Ήλιος.

Η σημασία του έργου του Κέπλερ δεν βρίσκεται τόσο στη συμβολή του στην πρόοδο της Αστρονομίας, όσο στη μέθοδο που χρησιμοποίησε, σύμφωνα με την οποία επεξεργάστηκε χιλιάδες δεδομένα για να καταλήξει σε μαθηματικές σχέσεις για την κίνηση των πλανητών. Μπορούμε να πούμε ότι μαζί με τον Γαλιλαίο συνέβαλε στο να διαμορφωθεί η καινούρια αντίληψη ότι η Φύση θα μπορούσε να περιγραφεί με τη γλώσσα των Μαθηματικών.

Η παρέμβαση του Νεύτωνα

Ο Νεύτων επενέβη στον επιστημονικό διάλογο όταν τα πράγματα είχαν ήδη προχωρήσει. Η άποψη όμως που εξακολουθούσε να επικρατεί ήταν ότι «οι ουράνιες κινήσεις δεν έχουν ανάγκη από εξήγηση».

Ο Γαλιλαίος, για παράδειγμα, παρόλο που είχε αντιπαρατεθεί σε τόσα δόγματα και ενώ υποστήριζε ότι για τα επίγεια αντικείμενα αδρανειακή (χωρίς δυνάμεις) κίνηση είναι η ευθύγραμμη ομαλή, επέμενε στο ότι για τα ουράνια σώματα η αδρανειακή κίνηση είναι η ομαλή κυκλική. Κατά την περιφορά, συνεπώς, της Σελήνης γύρω από τη Γη δεν χρειαζόταν, σύμφωνα με αυτόν, να ασκούνται δυνάμεις.

Ο Νεύτων υποστήριξε την ιδέα ότι για όλο το σύμπαν η μόνη αδρανειακή κίνηση (που δεν έχει ανάγκη από δυνάμεις) είναι η ευθύγραμμη ομαλή. Αυτό είχε σαν συνέπεια να διαφωνήσει με την άποψη του Γαλιλαίου και να θεωρήσει τις ουράνιες κινήσεις σαν αδιάκοπες παρεκκλίσεις από την αδρανειακή κίνηση, παρεκκλίσεις δηλαδή που οφείλονται στην επενέργεια κάποιων δυνάμεων. Τα ερωτήματα ήταν πολλά.

1. Ήταν δυνατόν να ασκούνται δυνάμεις μέσα από τις τεράστιες αποστάσεις που παρεμβάλλονταν ανάμεσα στα ουράνια σώματα;

2. Ποια ήταν η πηγή αυτών των δυνάμεων;

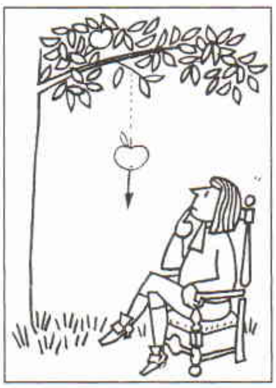
3. Ποια ήταν η φύση τους;

4. Ποιοι παράγοντες καθόριζαν τις τιμές τους;

Και δίπλα σ' όλα αυτά τα ερωτηματικά για τα ουράνια σώματα υπήρχαν και τα ζητήματα των επίγειων αντικειμένων. Τι ακριβώς σήμαινε η «βιασύνη» των επίγειων αντικειμένων να πέφτουν προς τη Γη, και μάλιστα –στο κενό– με την ίδια επιτάχυνση; Και το σοβαρότερο ήταν η μακρόχρονη παράδοση που επέμενε ότι τα γήινα γεγονότα έπρεπε να αντιμετωπίζονται με διαφορετικό τρόπο από τα ουράνια.

Ας δούμε τα ζητήματα με κάποια σειρά. Και πρώτα το αν *είναι δυνατόν να ασκούνται δυνάμεις από απόσταση*. Η απάντηση του Νεύτωνα ήταν καταφατική. Η δράση από απόσταση ήταν μια καινούρια λογική που παραβίαζε μια ακόμα παράδοση. Σ' αυτό βοήθησαν πολύ οι μαγνήτες. Ο William Gilbert (Γουίλιαμ Γκίλμπερτ) με το βιβλίο του *Περί Μαγνητών*, το 1600, υποστήριξε την ιδέα μιας δράσης από απόσταση. Από τον Gilbert μέχρι τον Νεύτωνα η ιδέα για δυνάμεις που θα μπορούσαν να ασκούνται χωρίς επαφή έκανε τη διαδρομή όλου του 17ου αιώνα, αποκτώντας ολοένα περισσότερους υποστηρικτές.

Έτσι, στο ζήτημα του βάρους ο Νεύτων βρέθηκε έτοιμος να ανταλλάξει την παραδοσιακή άποψη (ότι ήταν μια φυσική τάση των επίγειων σωμάτων να θέλουν να συναντήσουν τη Γη) με την καινούρια ιδέα ότι η Γη ασκεί μια δύναμη από απόσταση σε καθένα απ' αυτά. Το βάρος δηλαδή του μήλου ήταν μια δύναμη που ασκούσε η Γη στο μήλο όπως έκανε και ο μαγνήτης στα σιδερένια αντικείμενα, μόνο που η δύναμη της Γης δεν ήταν μαγνητική, ήταν μια δύναμη **βαρύτητας**.



Η ιδέα για δυνάμεις από απόσταση ενισχύθηκε. Εκτός από τη δύναμη του μαγνήτη και τη δύναμη της Γης στα επίγεια αντικείμενα, θα μπορούσαν να υπάρχουν και δυνάμεις ανάμεσα στα ουράνια σώματα.

Το μήλο και το φεγγάρι

Υπάρχει μια παράδοση που λέει ότι ο Νεύτων εμπνεύσθηκε βλέποντας ένα μήλο να πέφτει από τη μηλιά προς το έδαφος. Δεν είναι καθόλου βέβαιο ότι το επεισόδιο υπήρξε πραγματικά. Είναι αναμφίβολο όμως ότι κάτω από ορισμένες συνθήκες συ-

νέλαβε την ιδέα ότι οι δυνάμεις ανάμεσα στους πλανήτες θα μπορούσε να είναι δυνάμεις **βαρυτικές,** ίδιου δηλαδή χαρακτήρα με εκείνες που έλκουν τα μήλα προς τη Γη. Η πρώτη σκέψη που θέλησε να δοκιμάσει ήταν μήπως η δράση της Γης πάνω στο μήλο, που εκδηλωνόταν με την πτώση του, θα μπορούσε να «φθάνει» μέχρι το φεγγάρι και να του δημιουργεί την αναγκαία επιτάχυνση που το κάνει να παραμένει δορυφόρος της.

Μερικά χρόνια νωρίτερα, ο Robert Hook είχε υποστηρίξει ότι η δύναμη της βαρύτητας θα έπρεπε να ελαττώνεται ανάλογα με το τετράγωνο της απόστασης από το κέντρο της Γης. (Αν δηλαδή σε ορισμένη απόσταση η δύναμη είχε τιμή F, σε διπλάσια απόσταση θα έπρεπε η τιμή να γίνεται F/4, σε τριπλάσια F/9 κ.ο.κ.). Από τα δεδομένα που είναι μέχρι σήμερα διαθέσιμα είναι βέβαιο πως ο Νεύτων ήξερε ότι η απόσταση από το κέντρο της Σελήνης μέχρι το κέντρο της Γης ήταν περίπου 60 φορές μεγαλύτερη από την ακτίνα της Γης. Αν λοιπόν η έλξη ήταν αντίστροφα ανάλογη με το τετράγωνο της απόστασης από το κέντρο της Γης, η βαρυτική επιτάχυνση που θα έπρεπε να δημιουργεί η Γη στη Σελήνη θα ήταν το $1/60^2$ ή 1/3.600 της επιτάχυνσης που προκαλούσε στο μήλο. Ήξερε ότι η βαρυτική επιτάχυνση στην επιφάνεια της Γης (σε σημερινές μονάδες) ήταν περίπου 9,80 m/s^2. Στη σελήνη λοιπόν θα έπρεπε να δημιουργείται μια επιτάχυνση 9,8/3.600 m/s^2 ή $2{,}72 \cdot 10^{-3}$ m/s^2 περίπου. Ο Νεύτων ξέροντας ότι η περίοδος της περιφοράς της Σελήνης γύρω από τη Γη ήταν 27,33 μέρες περίπου, υπολόγισε την κεντρομόλο επιτάχυνση με βάση τη σχέση $\alpha = \upsilon^2/R$. Η ταχύτητα μπορούσε να υπολογιστεί από την ακτίνα της περιφοράς και την περίοδο, θεωρώντας φυσικά την κίνηση κατά προσέγγιση ομαλή κυκλική. Ο υπολογισμός έδινε $\alpha = 2{,}7 \cdot 10^{-3}$ m/s^2. Το αποτέλεσμα ήταν κάτι παραπάνω από ενθαρρυντικό. Η δύναμη που εξανάγκαζε τη Σελήνη να περιφέρεται γύρω από τη Γη έδειχνε να οφείλεται στη Γη και να είναι δύναμη βαρύτητας.

Μια έλξη παγκόσμια

Το επόμενο βήμα ήταν η γενίκευση. Με μία από τις τολμηρότερες γενικεύσεις στην ιστορία της ανθρώπινης σκέψης ο Νεύτων υποστήριξε ότι **κάθε σώμα του σύμπαντος έλκει κάθε άλλο σώμα με μία ελκτική δύναμη σαν αυτή της βαρύτητας.** Η βαρύτητα υπάρχει σε όλο το Σύμπαν. Υπάρχει όχι μόνο ανάμεσα στη Γη και τα μή-

λα αλλά και ανάμεσα στη Γη και το φεγγάρι, στο Δία και τους δορυφόρους του, στον Ήλιο και τους πλανήτες. Είναι μία έλξη **παγκόσμια.**

Ο Νεύτων δε σταμάτησε εκεί. Μελέτησε το ζήτημα της τιμής που έπρεπε να έχει η παγκόσμια έλξη, ώστε να μπορεί να εξηγεί τους νόμους του Κέπλερ για την πλανητική κίνηση. Το τελικό του συμπέρασμα ήταν ότι θα μπορούσαν να ερμηνευθούν με ενιαίο τρόπο τόσο τα γήινα γεγονότα όσο και τα ουράνια, αρκεί να γίνει δεκτό ότι ***δύο οποιαδήποτε (σημειακά) αντικείμενα του Σύμπαντος έλκονται από απόσταση με δύναμη ανάλογη προς το γινόμενο των μαζών τους * και αντιστρόφως ανάλογη προς το τετράγωνο της μεταξύ τους απόστασης.***

* Το μέγεθος που αναφέρεται ως *μάζα* είναι η λεγόμενη *βαρυτική μάζα*, η οποία ευθύνεται για την έλξη ανάμεσα στα σώματα. Για τον Νεύτωνα είναι ανάλογη με την *αδρανειακή μάζα*. Στον εικοστό αιώνα οι δύο μάζες θεωρούνται ίσες. Η ισότητα δεν είναι καθόλου αυτονόητη. Αποτέλεσε και ένα είδος αφετηρίας για την ανάπτυξη της Γενικής Θεωρίας της Σχετικότητας. Από δω και πέρα και για τα δύο μεγέθη θα χρησιμοποιούμε τη λέξη *μάζα* και το ίδιο σύμβολο "m".

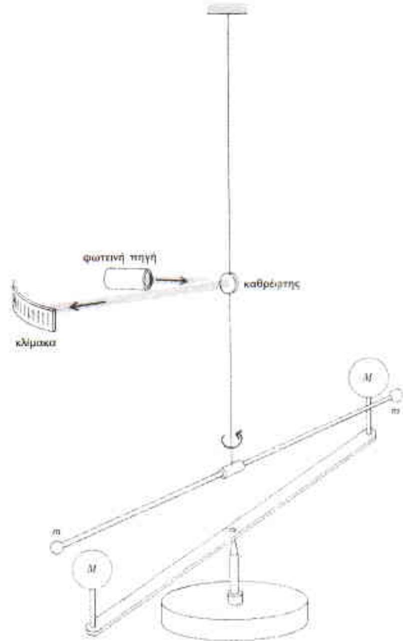
Ο νόμος της παγκόσμιας έλξης

Ας χρησιμοποιήσουμε τα σύμβολα m_1 και m_2 για να παραστήσουμε τις μάζες δύο υλικών σημείων που βρίσκονται σε απόσταση R. Σύμφωνα με τον νόμο της παγκόσμιας έλξης σε καθένα από αυτά ασκείται από το άλλο μια ελκτική δύναμη με μέτρο F, που δίνεται από τη σχέση:

$$F = G\frac{m_1 m_2}{R^2}$$

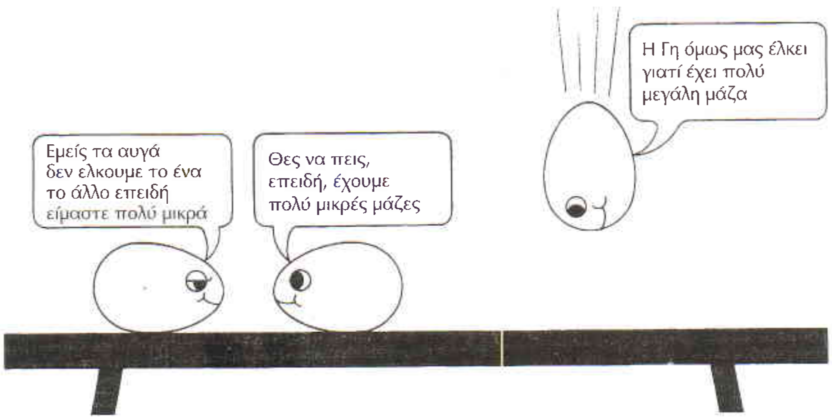
Το σύμβολο G παριστάνει μία φυσική ποσότητα με τιμή ανεξάρτητη από το υλικό που παρεμβάλλεται. Είναι μία ποσότητα, που έχει την ίδια τιμή για οποιεσδήποτε δύο μάζες σε οποιαδήποτε δύο σημεία του σύμπαντος και αν βρεθούν. Η ποσότητα αυτή λέγεται **σταθερά της παγκόσμιας έλξης.**

Η πειραματική επαλήθευση του νόμου δεν έγινε ούτε από τον Νεύτωνα ούτε από κανέναν άλλον επιστήμονα της εποχής. Μόνο στα 1798, ύστερα δηλαδή από έναν αιώνα και περισσότερο, ένας σημαντικός ερευνητής, συμπατριώτης του Νεύτωνα, ο Henry



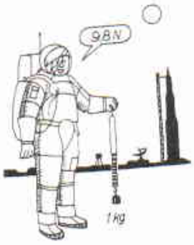
Ένα σχήμα που παριστάνει τον ζυγό στρέψεως του H. Cavendish. Η βαρυτική έλξη ανάμεσα στις δύο μάζες M και m, παρ' όλο που είναι πολύ μικρή, είναι δυνατόν να γίνει αντιληπτή με τη στρέψη του σύρματος.

Cavendish κατάφερε να κατασκευάσει ένα ιδιαίτερα ευαίσθητο δυναμόμετρο, τον λεγόμενο ζυγό στρέψεως, με τον οποίο πέτυχε να μετρήσει τη βαρυτική αλληλεπίδραση ανάμεσα σε δύο συνήθη σώματα και να υπολογίσει ότι η τιμή της σταθεράς G είναι $6{,}67 \cdot 10^{-11}$ $N \cdot m^2 \cdot kg^{-2}$.



Βάρος και βαρυτική επιτάχυνση

Η έλξη την οποία ασκεί μία ομογενής σφαίρα σε ένα υλικό σημείο αποδεικνύεται ότι είναι ίση με την έλξη που θα εκδηλωνόταν αν όλη η μάζα της σφαίρας ήταν συγκεντρωμένη στο κέντρο της. Η έλ-





ξη αυτή είναι συνισταμένη όλων των δυνάμεων που ασκούνται στο υλικό σημείο από όλα τα υλικά σημεία της σφαίρας. Σ' αυτή τη λογική μπορούμε να θεωρήσουμε τη Γη σαν μία ομογενή σφαίρα και να υπολογίσουμε τη βαρυτική έλξη που ασκεί* σε ένα οποιοδήποτε σώμα. Η έλξη αυτή λέγεται *βάρος του σώματος*. Αν χρησιμοποιήσουμε τα σύμβολα M και m για τις μάζες της Γης και του σώματος, το B για το βάρος του σώματος και το d για την απόστασή του από το κέντρο της Γης, θα ισχύει:

$$\mathbf{B = G\frac{Mm}{d^2}}$$

* Το 19ο αιώνα για την περιγραφή των βαρυτικών δυνάμεων άρχισε να επικρατεί η έννοια *πεδίο βαρύτητας*. Στο ερώτημα, δηλαδή, **ποιος ασκεί τη δύναμη βάρος;** μπορούμε να απαντάμε είτε **η Γη** είτε **το γήινο πεδίο βαρύτητας.**

Από την άλλη, σύμφωνα με τον δεύτερο νόμο της κίνησης η επιτάχυνση g, που προκαλείται από τη βαρυτική έλξη, θα είναι $g = B/m$ οπότε $g = GM/d^2$. Αν χρησιμοποιήσουμε και το R για το μήκος της ακτίνας του πλανήτη μας, η σχέση

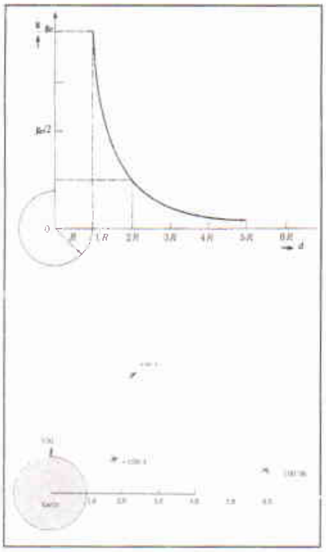
$$\mathbf{g_0 = G\frac{M}{R^2}}$$

θα μπορεί να μας δίνει τη βαρυτική επιτάχυνση (g_0) για τα σώματα που βρίσκονται κοντά στο έδαφος, σε ύψος δηλαδή ασήμαντο σε σχέση με την ακτίνα της Γης.

Η σχέση αυτή προσφέρει μια θεωρητική ερμηνεία στα πειραματικά δεδομένα της ελεύθερης πτώσης. Εκφράζει ότι η γήινη βαρυτική επιτάχυνση έχει την ίδια τιμή για όλα τα σώματα και η τιμή της καθορίζεται από δύο χαρακτηριστικά του πλανήτη μας, από τη μάζα και από την ακτίνα του. Στη σχετική προσέγγιση ο πλανήτης μας θεωρείται απόλυτα σφαιρικός.

Εννοείται ότι μια παρόμοια σχέση θα μας δίνει τη βαρυτική επιτάχυνση στη Σελήνη ή σε κάποιο πλανήτη, τον Άρη, για παράδειγμα. Στη Σελήνη η τιμή της βαρυτικής επιτάχυνσης, που δημιουργείται από τη μάζα της, είναι περίπου 1,70 m/s^2. Αυτό σημαίνει ότι, αν ένα σώμα με μάζα 1 kg ζυγίζει στη Γη 9,8 N, θα ζυγίζει 1,7 N στο σεληνιακό έδαφος.

Ας προσέξουμε τη σχέση ανάμεσα στην τιμή της βαρυτικής επιτάχυνσης «g» και την απόσταση από το κέντρο της Γης. Η εξίσωση $g = GM/d^2$ δείχνει ότι η g ελαττώνεται με το τετράγωνο της από-



στασης από το κέντρο της Γης.

Αντίστοιχα, καθώς ένας άνθρωπος απομακρύνεται από την επιφάνεια της Γης, το βάρος του ελαττώνεται. Ένας αρκετά ευτραφής κύριος που ζυγίζει εκατό κιλά στην επιφάνεια της Γης, θα ζυγίζει 25 κιλά όταν βρεθεί σε ύψος R, ίσο δηλαδή με τη γήινη ακτίνα. Ο ίδιος θα ζυγίζει 6,25 κιλά σε ύψος 3R και μόνο 2,8 κιλά σε ύψος 5R, χωρίς να έχει χάσει τίποτε από την αξιοσέβαστη αδράνειά του. Όποιος θελήσει να τον σπρώξει θα το καταλάβει αμέσως.

Οι τεχνητοί δορυφόροι

Στις 4 Οκτωβρίου του 1957 η ανθρωπότητα παρακολούθησε το άνοιγμα της διαστημικής εποχής. Ο πρώτος τεχνητός δορυφόρος, ο Σπούτνικ Ι, πραγματοποιούσε τις πρώτες περιφορές του γύρω από τη Γη σε περίοδο 96 πρώτων λεπτών. Ύστερα από ένα μήνα και ενώ ο Σπούτνικ Ι βρισκόταν πάντα σε τροχιά, εκτοξεύτηκε ο πολύ μεγαλύτερός του Σπούτνικ ΙΙ μεταφέροντας στο διάστημα το πρώτο ζωντανό πλάσμα, τη σκύλα Λάικα. Τρισήμισυ περίπου χρόνια αργότερα τα πρωτοσέλιδα των εφημερίδων όλου του κόσμου φιλοξενούν την είδηση για ένα παραπέρα βήμα στην προσπάθεια για την εξερεύνηση του σύμπαντος. «Άνθρωπος στο διάστημα». Ο Σοβιετικός Γιούρι Γκαγκάριν γίνεται ο πρώτος αστροναύτης στην ιστορία των ανθρώπων. Σήμερα χιλιάδες δορυφόροι βρίσκονται σε τροχιά και συμβάλλουν σε έρευνες που αφορούν την αστρονομία, τις κοσμικές ακτίνες, τις τηλεπικοινωνίες, τη μετεωρολογία και τη βιολογία.



ΘΡΙΑΜΒΟΣ

ΤΟ ΜΕΓΑΛΥΤΕΡΟΝ ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟΝ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΟΝ ΕΠΙΤΕΥΓΜΑ ΤΟΥ 20ου ΑΙΩΝΟΣ

ΟΙ ΡΩΣΟΙ ΕΞΑΠΕΛΥΣΑΝ ΧΘΕΣ ΑΝΘΡΩΠΟΝ ΕΙΣ ΤΟ ΔΙΑΣΤΗΜΑ ΚΑΙ ΤΟΝ ΕΠΑΝΕΦΕΡΑΝ ΜΕΤΑ 1.30' ΩΡΑΝ ΕΙΣ ΤΟ ΕΔΑΦΟΣ

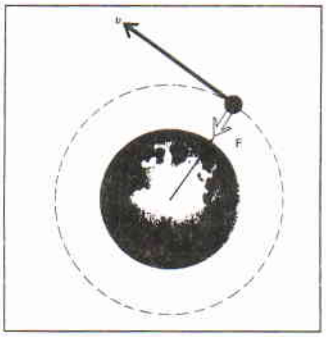
Ο ΝΕΑΡΟΣ ΕΠΙΣΜΗΝΑΓΟΣ ΓΙΟΥΡΙ ΓΚΑΓΚΑΡΙΝ ΚΑΤΗΛΘΕ ΣΩΟΣ ΑΦΟΥ ΔΙΕΓΡΑΨΕ ΕΙΣ ΥΨΟΣ ΜΕΤΑΞΥ 175-302 ΧΛΜ. ΠΛΗΡΗ ΤΡΟΧΙΑΝ ΠΕΡΙ ΤΗΝ ΓΗΝ ΕΝΤΟΣ 89'

ΠΑΡΑΤΗΡΩΝ ΤΗΝ ΓΗΝ ΔΙΕΚΡΙΝΕ ΤΑΣ ΗΠΕΙΡΟΥΣ, ΤΑ ΟΡΗ, ΤΑΣ ΘΑΛΑΣΣΑΣ Κ' ΕΣΤΕΛΛΕ ΜΗΝΥΜΑΤΑ

ΜΗΝΥΜΑ ΤΗΣ ΡΩΣΙΚΗΣ ΚΥΒΕΡΝΗΣΕΩΣ ΠΡΟΣ ΟΛΑΣ ΤΑΣ ΧΩΡΑΣ

Η κίνηση ενός δορυφόρου βασίζεται στη βαρυτική έλξη που του ασκεί η Γη, κάτι ανάλογο, δηλαδή, με αυτό που συμβαίνει με το φεγγάρι κατά την περιφορά του γύρω από τον πλανήτη μας.

Αν από ύψος h πάνω από το έδαφος εκτοξευθεί ένα σώμα με



Δορυφόρος σε κυκλική τροχιά. Με το διάνυσμα $\vec{υ}$ παριστάνεται η ταχύτητά του. Το διάνυσμα $\vec{F}$ παριστάνει τη βαρυτική έλξη που του ασκεί η Γη. Εφόσον η συνισταμένη δύναμη είναι η βαρυτική έλξη, αξίζει να προσέξουμε ότι η επιτάχυνση ενός δορυφόρου είναι η βαρυτική επιτάχυνση g, στο ύψος που κινείται.

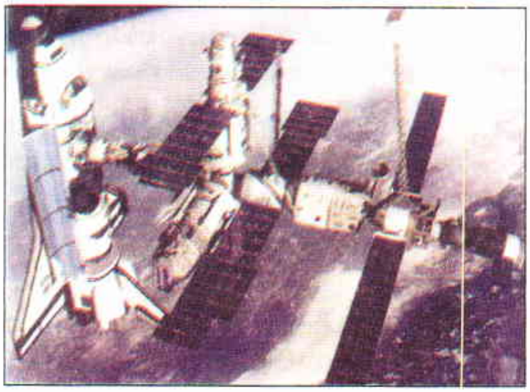
κατεύθυνση κάθετη στη βαρυτική επιτάχυνση, στη συνέχεια είναι δυνατόν να γίνει δορυφόρος της Γης, αρκεί η ταχύτητα να έχει μία τιμή κατάλληλη. Μπορούμε να μελετήσουμε θεωρητικά το ζήτημα για την περίπτωση κυκλικής τροχιάς. Η μοναδική δύναμη που ασκείται στο δορυφόρο είναι βαρυτική έλξη από τη Γη, για την οποία ισχύει $F = G\,Mm / (R + h)^2$, όπου M η μάζα της Γης και m η μάζα του δορυφόρου. Η ίδια αυτή δύναμη εφ' όσον είναι η συνισταμένη θα πρέπει να υπακούει και στο δεύτερο νόμο της κίνησης, να είναι δηλαδή ίση με τη μάζα του δορυφόρου επί την κεντρομόλο επιτάχυνση. $F=mα$. Αλλά για την κεντρομόλο επιτάχυνση ισχύει $α = υ^2 / (R + h)$. Από τις τρεις προηγούμενες σχέσεις προκύπτει ότι:

$$G\frac{Mm}{(R+h)^2} = \frac{mυ^2}{R+h} \quad \text{άρα} \quad υ = \sqrt{G\frac{M}{R+h}}$$

Στις σχέσεις αυτές το άθροισμα R+h αποτελεί την απόσταση του δορυφόρου από το κέντρο της Γης και ταυτόχρονα την ακτίνα της τροχιάς του. Το συμπέρασμα είναι ότι σε κάθε ύψος υπάρχει μία μόνο «κατάλληλη» τιμή ταχύτητας για να πραγματοποιηθεί μια τέτοια δορυφοροποίηση.

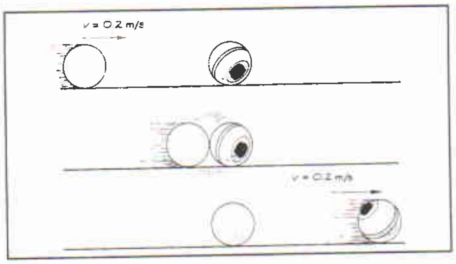


«...Αν η πέτρα εκσφενδονιστεί με μεγαλύτερη ταχύτητα, θα πάει ακόμα μακρύτερα προτού ξαναπέσει στη Γη. Μπορούμε λοιπόν να συμπεράνουμε ότι αυξάνοντας την αρχική της ταχύτητα θα μπορέσει να διανύσει αποστάσεις 1, 2, 5, 10, 100, 1000 μιλίων προτού να ξαναπέσει στη Γη, μέχρι το σημείο, όπου ξεπερνώντας τα όρια της Γης θα συνεχίσει την τροχιά της στο διάστημα χωρίς να αγγίζει το έδαφος...». (Το κείμενο και το σχέδιο υπάρχουν σε βιβλίο του Νεύτωνα).



Τέλη του εικοστού αιώνα. Ο ρωσικός διαστημικός σταθμός Mir σε δορυφορική τροχιά συναντάται με αμερικανικό σκάφος

Η διατήρηση της ορμής



Το γινόμενο μάζα επί ταχύτητα

Γεγονότα και ερωτήματα.

Στο μπιλιάρδο. Η μία μπίλια προσκρούει πάνω στην άλλη –αρχικά ακίνητη– και την ακινητοποιεί. Σύγκρουση. Οι φυσικοί συνηθίζουν να λένε *κρούση*. Θα μπορούσαμε άραγε να προβλέψουμε τη συμπεριφορά κάθε μπίλιας μετά την κρούση; Τι θα συνέβαινε αν η αρχικά ακίνητη είχε μεγαλύτερη μάζα;

Στην Εθνική οδό. Το γιωταχί φρενάρει απότομα και το φορτηγό που ερχόταν από πίσω πέφτει με φόρα πάνω του και το παρασύρει. Ένα ερώτημα: Ποια στοιχεία θα καθορίσουν την ταχύτητα του συσσωματώματος;

Στο πεδίο της μάχης. Καθώς το κανόνι εκπυρσοκροτεί, οπισθοδρομεί, εκτινάσσεται, δηλαδή, προς τα πίσω.
Οι φυσικοί λένε *ανάκρουση*. Το ίδιο συμβαίνει και σε κάθε είδους πυροβολισμό. Το όπλο–πιστόλι, καραμπίνα, αεροβόλο – κατά τον πυροβολισμό κλωτσάει προς τα πίσω. Προσέχουμε ότι το βλήμα έχει πολύ μικρότερη μάζα από το όπλο αλλά και πολύ μεγαλύτερη ταχύτητα. Τι ακριβώς συμβαίνει;

Στο ακρωτήριο Κανάβεραλ. Καθώς το διαστημικό σκάφος εκτοξεύεται προς τα πάνω, τα αέρια της καύσης εξέρχονται προς τα κάτω με τρομακτική ταχύτητα. Ποιο είναι το μυστικό;

Μέσα στη θάλασσα. Ορισμένα οστρακοφόρα για να μετακινηθούν εκτοξεύουν μία ουσία οπότε εκείνα κινούνται προς την αντίθετη κατεύθυνση.

Υποψίες

Κρούσεις και ανακρούσεις. Μια μεγάλη ποικιλία γεγονότων με καραμπίνες, φορτηγά, μπίλιες, οστρακοφόρα και διαστημικά οχήμα-

τα. Και μια υποψία.

Ότι οι ποικίλες κρούσεις και ανακρούσεις υπακούουν σε κάποιο ενιαίο νόμο. Η διαδρομή όμως –από τα γεγονότα στους νόμους– δεν μπορεί να γίνει παρά μόνο με «όχημα» που περιέχει τις κατάλληλες έννοιες. Ποιες έννοιες πρέπει, άραγε, να χρησιμοποιήσουμε στη συγκεκριμένη περίπτωση; Υποπτευόμαστε ότι θα χρειαστεί να βασιστούμε στις έννοιες μάζα και ταχύτητα.

Πειράματα

Καταφεύγουμε στο εργαστήριο. Εκεί αναπαράγουμε τεχνητά κάποια φαινόμενα όπως οι συγκρούσεις κατά τις οποίες φροντίζουμε να μετράμε μάζες και ταχύτητες.

Πάνω στο τραπέζι του εργαστηρίου βρίσκονται δύο σώματα των οποίων τις μάζες έχουμε προηγουμένως μετρήσει.

Τα δύο αυτά σώματα θα μπορούσε να είναι δύο καροτσάκια εργαστηρίου. Το ένα απ' αυτά (μάζας m_1) κινούμενο με ταχύτητα $υ$ –την οποία μπορούμε να μετράμε με ηλεκτρικό χρονομετρητή– προσπίπτει στο άλλο (μάζας m_2) το οποίο είναι ακίνητο.

Τα δύο αντικείμενα συσσωματώνονται και συνεχίζουν να κινούνται με ταχύτητα V την οποία μπορούμε να μετρήσουμε. Επαναλαμβάνουμε με διαφορετικές τιμές μαζών και ταχυτήτων.

Μέσα από τα σφάλματα –τα οποία σε κάθε μέτρηση κάνουν την εμφάνισή τους– μπορούμε να διακρίνουμε ότι σε όλες τις περιπτώσεις το γινόμενο $m_1υ$ είναι ίσο με το γινόμενο $(m_1+m_2)V$.

Ο δρόμος της θεωρίας

Οι εργαστηριακές μετρήσεις μάς δίνουν κάποια μηνύματα για το γινόμενο *μάζα επί ταχύτητα* αλλά το «ποιος ακριβώς είναι ο νόμος» δεν έχει ακόμα φανεί. Ας κοιτάξουμε προς το μέρος της θεωρίας, προς τους νευτωνικούς δηλαδή νόμους της κίνησης.

Υποθέτουμε ότι δύο μπίλιες $Σ_1$ και $Σ_2$ –με μάζες m_1 και m_2 κινούμενες έτσι ώστε τα κέντρα τους να βρίσκονται συνεχώς στην ίδια ευθεία– συγκρούονται.

Έστω ότι οι ταχύτητές τους *πριν* από την κρούση είναι $υ_1$ και $υ_2$ και αμέσως *μετά* V_1 και V_2 αντίστοιχα. Εφαρμόζουμε τους νευτωνικούς νόμους της κίνησης.

Στη μπίλια $Σ_1$. Η ταχύτητα της ήταν $υ_1$ και έγινε V_1. Η μεταβολή της είναι $V_1–υ_1$. Υποθέτουμε ότι πραγματοποιήθηκε σε χρόνο $Δt$

στον χρόνο δηλαδή που διαρκεί η σύγκρουση. Συμβολίζουμε με F_{21} τη δύναμη που ασκήθηκε στην $Σ_1$ (από τη $Σ_2$) οπότε, σύμφωνα με τον δεύτερο νόμο της κίνησης, θα είναι

$$\vec{F}_{21} = m_1 \frac{\vec{V}_1 - \vec{υ}_1}{Δt} \quad (1)$$

Στη μπίλια $Σ_2$. Η ταχύτητά της ήταν $υ_2$ και έγινε V_2. Η μεταβολή V_2-$υ_2$ πραγματοποιήθηκε επίσης σε χρόνο Δt στο χρόνο δηλαδή που διαρκεί η σύγκρουση. Συμβολίζουμε με F_{12} τη δύναμη που ασκήθηκε στην $Σ_2$ (από τη $Σ_1$) οπότε, σύμφωνα με τον δεύτερο νόμο της κίνησης, θα είναι

$$\vec{F}_{21} = m_2 \frac{\vec{V}_2 - \vec{υ}_2}{Δt} \quad (2)$$

Η δύναμη $\vec{F}_{21}$ την οποία ασκεί η $Σ_2$ στην $Σ_1$ είναι αντίδραση της F_{12} την οποία ασκεί η $Σ_1$ στη $Σ_2$. Σύμφωνα με τον τρίτο νευτωνικό νόμο της κίνησης θα ισχύει

$$\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21} \quad (3)$$

Από τις τρεις αυτές εξισώσεις εύκολα προκύπτει ότι

$$m_1 (\vec{V}_1 - \vec{υ}_1) = - m_2 (\vec{V}_2 - \vec{υ}_2) \text{ οπότε}$$

$$m_1 \vec{υ}_1 + m_2 \vec{υ}_2 = m_1 \vec{V}_1 + m_2 \vec{V}_2$$

Η τελευταία αυτή εξίσωση μας λέει καθαρά ότι υπάρχει μια διανυσματική ποσότητα η οποία *κατά τη διάρκεια της κρούσης* –παρόλα τα πολύπλοκα που συμβαίνουν– *διατηρείται σταθερή*. Η ποσότητα αυτή αφορά στο σύστημα των δύο σωμάτων και λέγεται *ορμή του συστήματος*.

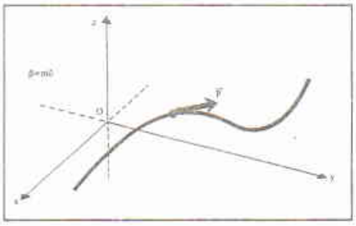
Τι το ιδιαίτερο, όμως, εμφανίζει το συγκεκριμένο σύστημα ώστε η ορμή του να διατηρείται σταθερή;

Η απάντηση είναι ότι στο σύστημα ($Σ_1$, $Σ_2$) κατά τη διάρκεια της σύγκρουσης *δεν ασκούνται εξωτερικές δυνάμεις*. Αν θεωρήσουμε ως σώμα τη μπίλια $Σ_1$ οφείλουμε να αποδεχτούμε ότι κατά τη διάρκεια της σύγκρουσης ασκείται σ' αυτήν δύναμη από τη $Σ_2$. Αν πάλι θεωρήσουμε ως σώμα τη μπίλια $Σ_2$, σ' αυτήν, κατά τη διάρκεια της σύγκρουσης ασκείται δύναμη από τη $Σ_1$. Αν όμως θεωρήσουμε το σύστημα των δύο σφαιρών θα πρέπει να αποδεχτούμε ότι σ' αυτό δεν ασκούνται εξωτερικές δυνάμεις.

Πολλές φορές εντοπίζουμε τη μελέτη μας σε ένα σύνολο σωμάτων, τα οποία απομονώνουμε –νοητικά– από το περιβάλλον. Λέμε τότε ότι έχουμε ένα *σύστημα σωμάτων*. Τις δυνάμεις που ασκούνται στα σώματα του συστήματός μας από τα σώματα του περιβάλλοντος τις χαρακτηρίζουμε σαν *εξωτερικές*, ενώ εκείνες που ασκούνται μεταξύ των σωμάτων του συστήματος τις λέμε *εσωτερικές*. Αν θεωρήσουμε ένα βιβλίο σαν σύστημα, οι δυνάμεις που ασκεί κάθε σελίδα στις διπλανές της είναι δυνάμεις εσωτερικές.

Ορμή υλικού σημείου

Σε κάθε υλικό σημείο που κινείται ως προς κάποιο σύστημα αναφοράς αποδίδουμε μία ορμή. **Ονομάζουμε *ορμή υλικού σημείου* το γινόμενο της μάζας του επί την ταχύτητά του.** Αν την συμβολίσουμε με το γράμμα "p" θα μπορούμε να γράψουμε την εξίσωση ορισμού η οποία εκφράζει ότι η ορμή είναι μέγεθος διανυσματικό με την κατεύθυνση της ταχύτητας και μέτρο ίσο με το γινόμενο της μάζας επί το μέτρο της ταχύτητας.



$$\vec{p} = m\vec{\upsilon}$$

Μονάδα για τη μέτρηση της ορμής στο Διεθνές Σύστημα θα είναι το 1 kg m/s ή το 1 Ns.

Ορμή συστήματος

Μεγάλο όμως ενδιαφέρον παρουσιάζει και η έννοια *ορμή συστήματος* η οποία ορίζεται ως το διανυσματικό άθροισμα των ορμών των υλικών σημείων του συστήματος.

$$\vec{p} = m_1\vec{\upsilon}_1 + m_2\vec{\upsilon}_2 + \dots + m_\nu\vec{\upsilon}_\nu$$

Ορμή ενός σώματος

Όταν ένα σώμα εκτελεί μεταφορική κίνηση τα υλικά σημεία του έχουν κοινή ταχύτητα οπότε η ορμή του μπορεί εύκολα να υπολογιστεί. Θα είναι ίση με το γινόμενο της μάζας του σώματος επί την ταχύτητά του.

Η αρχή της διατήρησης της ορμής

Βασιζόμενοι στους δύο νευτωνικούς νόμους της κίνησης αποδείξαμε θεωρητικά ότι όποτε συμβαίνει σύγκρουση δύο σωμάτων στα οποία δεν ασκούνται εξωτερικές δυνάμεις, η ορμή του συστήματος πριν από τη σύγκρουση είναι ίση με την ορμή του συστήματος μετά.

Το συμπέρασμα αυτό αποτελεί ειδική περίπτωση ενός γενικού νόμου ο οποίος αναφέρεται σε οποιοδήποτε σύστημα στο οποίο δεν ασκούνται εξωτερικές δυνάμεις. Σύμφωνα μ' αυτόν

Η ορμή ενός συστήματος διατηρείται εφόσον δεν ασκούνται εξωτερικές δυνάμεις.

Ο νόμος αυτός αναφέρεται συνήθως ως **αρχή της διατήρησης της ορμής.**

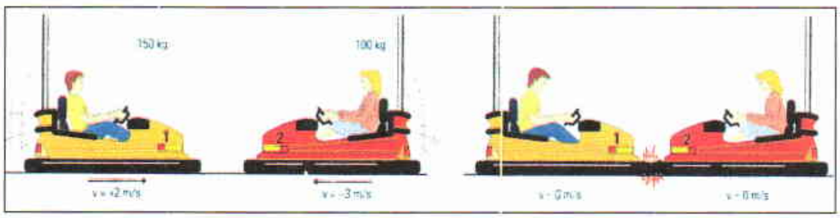
Αν το σύστημα αποτελείται από δύο υλικά σημεία (ή δύο σώματα σε μεταφορική κίνηση) μαζών m_1 και m_2 γράφουμε

$$\mathbf{m_1 \vec{\upsilon}_1 + m_2 \vec{\upsilon}_2 = m_1 \vec{V}_1 + m_2 \vec{V}_2}$$

θεωρώντας $\vec{\upsilon}_1$, $\vec{\upsilon}_2$ τις ταχύτητες πριν και $\vec{V}_1$, $\vec{V}_2$ τις ταχύτητες μετά από οποιασδήποτε φύσης αλληλεπίδραση, αρκεί στη διάρκειά της να μην ασκήθηκαν πάνω στο σύστημα δυνάμεις εξωτερικές.

Αν οι ταχύτητες έχουν όλες την ίδια διεύθυνση, μπορούμε να καταστρώνουμε την εξίσωση χρησιμοποιώντας απ' ευθείας τις αλγεβρικές τιμές. Θα γράφουμε δηλαδή:

$$\mathbf{m_1 \upsilon_1 + m_2 \upsilon_2 = m_1 V_1 + m_2 V_2}$$



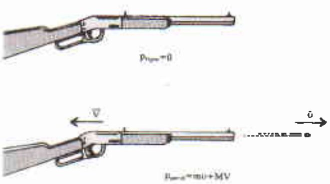
Η αρχή της διατήρησης της ορμής μολονότι απορρέει από τους νευτωνικούς νόμους της κίνησης ισχύει και για τη συμπεριφορά των σωματιδίων του Μικρόκοσμου για μια, δηλαδή, κατηγορία φαι-

νομένων για την οποία οι φυσικοί του εικοστού αιώνα ισχυρίζονται ότι δεν ισχύουν οι νευτωνικοί νόμοι της κίνησης.

Η φυσική ερμηνεύει και προβλέπει

Δύο είναι οι βασικότεροι ρόλοι της φυσικής. Το «να ερμηνεύει» και το «να προβλέπει». Ερμηνεύει αυτό που έχει συμβεί, μπορεί όμως και να προβλέψει αυτό που θα γίνει.

Φαινόμενα όπως η ενσωμάτωση ενός νετρονίου σε πυρήνα αζώτου, η ανάκρουση ενός όπλου και η προώθηση των σύγχρονων πυραύλων μπορούν να προβλεφτούν βάσει της αρχής της διατήρησης της ορμής. Η ίδια αρχή συμβάλλει στο να ερμηνεύσουμε αυτό που θα συμβεί ύστερα από μια κρούση ανάμεσα σε δύο μπίλιες μπιλιάρδου αλλά και στο να συσχετίσουμε την ταχύτητα ενός βλήματος με την ταχύτητα που θα προσδώσει σ' έναν κρεμασμένο σάκο στον οποίο θα ενσφηνωθεί.



Ας δούμε *πώς* μπορεί κανείς να προβλέψει την ταχύτητα ανάκρουσης ενός όπλου. Όταν γίνεται ένας πυροβολισμός, το όπλο εκτινάσσεται προς την αντίθετη κατεύθυνση. Αν εφαρμόσουμε την αρχή της διατήρησης της ορμής για το σύστημα «βλήμα-όπλο», θα μπορέσουμε να δούμε από τι εξαρτάται η ταχύτητα της ανάκρουσης. Την εφαρμόζουμε:

$p_{πριν} = 0$, $p_{μετά} = mυ + MV$, $p_{πριν} = p_{μετά}$, από τις οποίες $0 = mυ + MV$

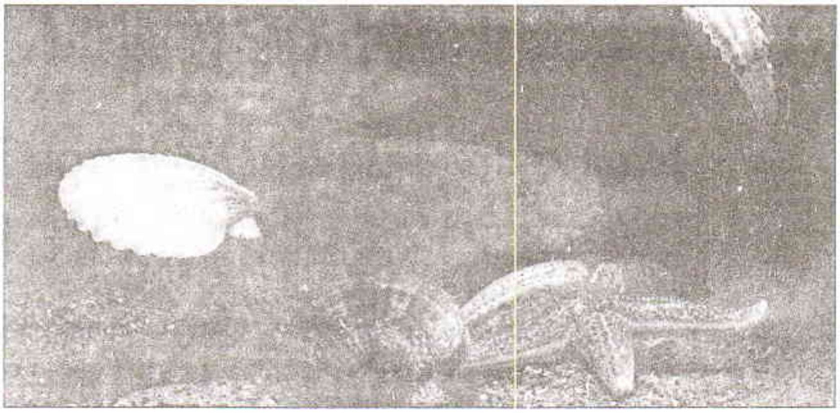
$$\text{άρα } V = -\frac{m}{M}υ$$

Βλέπουμε δηλαδή ότι η ταχύτητα της ανάκρουσης εξαρτάται από την ταχύτητα του βλήματος αλλά και από τον λόγο των μαζών βλήματος - όπλου.

Στην ίδια αρχή βασίζεται και η προώθηση ορισμένων ζώων της θάλασσας, όπως τα οστρακοφόρα, όταν θέλουν να αποφύγουν κάποιο κίνδυνο.

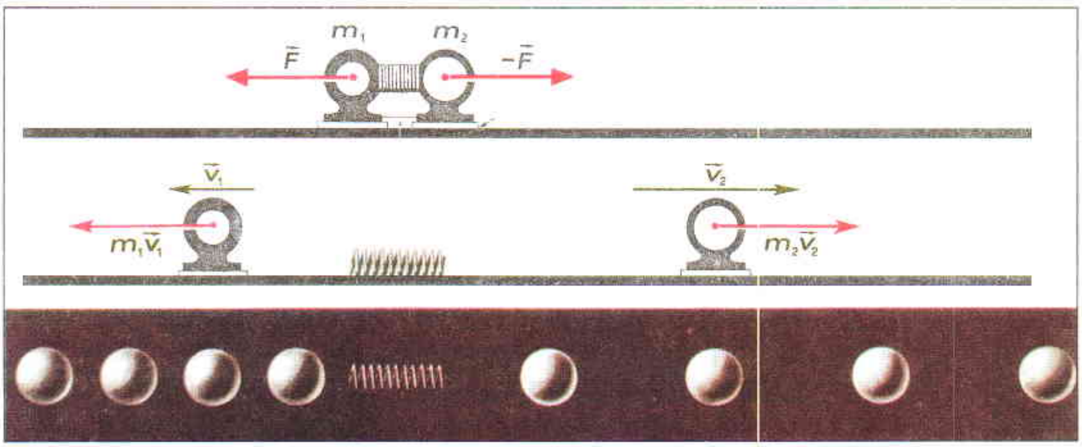


Στην ίδια, πάλι, αρχή βασίζεται και η προώθηση που δημιουργείται στις περίφημες εκείνες αυτοκίνητες μηχανές, τις οποίες ο άνθρωπος από τη μια τις αξιοποίησε για να ταξιδέψει στο διάστημα, ενώ από την άλλη τις χρησιμοποίησε και εξακολουθεί να τις χρησιμοποιεί σαν πρωταρχικό πια όπλο στον αμείλικτο αγώνα



δρόμου των εξοπλισμών. Μιλάμε, φυσικά, για τους πυραύλους.

Στο εσωτερικό ενός πυραύλου βρίσκεται ο θάλαμος καύσης. Μέσα σ' αυτόν αναφλέγεται υγρό ή στερεό καύσιμο. Ο θάλαμος έχει άνοιγμα από το οποίο εξέρχονται τα αέρια της καύσης με πολύ μεγάλη ταχύτητα. Το γεγονός έχει σαν συνέπεια να αυξάνεται η ταχύτητα του πυραύλου.



Ενα πείραμα για να επιβεβαιωθεί η αρχή της διατήρησης της ορμής

Ερωτήσεις και προβλήματα

α) Αν σε κάποιο πρόβλημα χρειαστείτε το μέτρο της βαρυτικής επιτάχυνσης να το θεωρήσετε γνωστό και ίσο με 10 m/s^2.
β) Η αντίσταση του αέρα σε όλα τα προβλήματα θεωρείται αμελητέα.
γ) Ο όρος *αντικείμενο* υποδηλώνει σημειακό αντικείμενο (υλικό σημείο).
δ) Στα φαινόμενα ευθύγραμμης κίνησης και ισορροπίας ο όρος *ασκείται δύναμη* υποδηλώνει *ασκείται σταθερή δύναμη*.
ε) Η δύναμη την οποία ασκεί ένα τεντωμένο νήμα αμελητέας μάζας στο σώμα που προσδένεται στο ένα άκρο του, να θεωρηθεί ότι έχει το ίδιο μέτρο με τη δύναμη που ασκεί το νήμα στο σώμα που προσδένεται στο άλλο άκρο του.



3.1. Στα τέσσερα διαφορετικά γεγονότα που περιγράφονται στην ενότητα *Μια κοινή αιτία για τις επιταχύνσεις* το κοινό στοιχείο είναι ότι ένα σώμα παρουσίασε μεταβολή στην κινητική του κατάσταση. Ένα ακόμα κοινό στοιχείο είναι ότι στα τέσσερα γεγονότα η μεταβολή αυτή θεωρείται αποτέλεσμα κάποιας δύναμης που ασκήθηκε σε κάποιο *σώμα* από κάποιο *περιβάλλον*.
α) Ποιο αντικείμενο θεωρείται *σώμα* σε καθένα από τα τέσσερα γεγονότα;
β) Ποιο θεωρείται *περιβάλλον* σε καθένα από τα γεγονότα;

3.2. Τι είναι η ελαστικότητα σχήματος;

3.3. Σε ποια φαινόμενα αναφέρεται ο νόμος Hooke; Πώς διατυπώνεται;

3.4. Γιατί η δύναμη θεωρείται μέγεθος διανυσματικό;

3.5. Ποια είναι τα στοιχεία της συνισταμένης δύο δυνάμεων οι οποίες ασκούνται στο ίδιο σημειακό αντικείμενο και α) έχουν την ίδια κατεύθυνση β) έχουν κατευθύνσεις αντίθετες γ) είναι κάθετες μεταξύ τους;

3.6. Κατά την ανάλυση μιας δύναμης F σε δύο κάθετες συνιστώσες F_x και F_y, οι τιμές των συνιστωσών είναι $F_x = F$ συνθ και $F_y = F$ ημθ. Ποια είναι η γωνία θ;

3.7. Πόσων ειδών κινήσεις διακρίνει η αριστοτελική φυσική στα επίγεια σώματα; Πόσων ειδών κινήσεις διακρίνει στα ουράνια; Ποιες είναι οι κινήσεις αυτές;

3.8. Από τι καθορίζεται η φυσική κίνηση σύμφωνα με την αριστοτελική φυσική; Αναφέρετε δύο παραδείγματα.

3.9. Ποιές κινήσεις έχουν την ανάγκη μιας κινητήριας δύναμης σύμφωνα με την αριστοτελική φυσική; Πώς εξηγείται η κίνηση ενός βέλους που έχει εκτοξευτεί;

3.10. «Τι πρέπει να συμβαίνει ώστε να μπορεί ένα σώμα να κινείται με σταθερή ταχύτητα;» Ποια είναι η ενστικτώδης απάντηση στην οποία μας σπρώχνει η λογική της καθημερινής εμπειρίας; Ποια απάντηση έδωσε ο Νεύτων με τον νόμο της αδράνειας;

3.11. Ποια είναι τα πιο σημαντικά σημεία του νόμου της αδράνειας;

3.12. Οι δύο αλγεβρικές εξισώσεις $\Sigma F_x = 0$ και $\Sigma F_y = 0$ αποτελούν την ικανή και αναγκαία συνθήκη για την ισορροπία ομοεπίπεδων δυνάμεων ασκουμένων σε

υλικό σημείο. Τι παριστάνουν τα σύμβολα ΣF_x και ΣF_y; Τι ακριβώς σημαίνει «ικανή και αναγκαία συνθήκη» σ' αυτήν την περίπτωση;

3.13. Τι θεωρείται *αδράνεια* α) στον πρώτο νόμο της κίνησης; β) κατά τη μεταβαλλόμενη κίνηση ενός σώματος;

3.14. Τι λέγεται μάζα ενός σώματος; Ποια είναι η μονάδα μετρήσεως της μάζας στο Διεθνές Σύστημα;

3.15. Διαθέτετε ένα τραπέζι εργαστηρίου, καροτσάκι, λάστιχο και ηλεκτρικό χρονομετρητή. Περιγράψτε ένα πείραμα στο οποίο να καταδεικνύεται η σχέση της (συνισταμένης) δύναμης με την επιτάχυνση.

3.16. Σε ποιο ερώτημα απαντά ο θεμελιώδης νόμος της δυναμικής; Τι απάντηση δίνει;

3.17. Η θεμελιώδης εξίσωση της δυναμικής γράφεται και $F = m\alpha$. Τι παριστάνει κάθε σύμβολο;

3.18. Εφόσον οι ασκούμενες δυνάμεις είναι ομοεπίπεδες, από τη θεμελιώδη εξίσωση $F = m\alpha$ μπορούμε να πάρουμε δύο αλγεβρικές εξισώσεις, την $\Sigma F_x = m\,\alpha$ και την $\Sigma F_y = 0$. Τι παριστάνουν τα ΣF_x και ΣF_y;

3.19. Ποια σχέση συνδέει το βάρος ενός σώματος με τη μάζα του και με τη βαρυτική επιτάχυνση του τόπου; Πού βασίζεται;

3.20. Πώς θα μετρήσουμε τη μάζα ενός σώματος ζυγίζοντάς το; Πού βασιζόμαστε; Με ποιον άλλο τρόπο μπορούμε να μετρήσουμε τη μάζα;

3.21. Σε τι αναφέρεται ο τρίτος νόμος της κίνησης; Πώς διατυπώνεται; Πώς τον διετύπωσε ο Νεύτων στα *Principia;*

3.22. Πώς ερμηνεύεται, βάσει του τρίτου νόμου της κίνησης, η εκκίνηση ενός δρομέα;

3.23. Ένα ποτήρι βρίσκεται ακίνητο σ' ένα τραπέζι. Σημειώστε τις δυνάμεις που ασκούνται σ' αυτό. Αν το ίδιο ποτήρι βρίσκεται ακίνητο σ' ένα τραπέζι που παρουσιάζει κλίση, σημειώστε τις δυνάμεις που ασκούνται σ' αυτό.

3.24. Ποιες δυνάμεις ασκούνται σ' ένα αντικείμενο που ολισθαίνει σε κεκλιμένο επίπεδο χωρίς τριβές;

3.25. Πότε εμφανίζεται στατική τριβή; Με ποια άλλη δύναμη πάντοτε συνυπάρχει;

3.26. Κάποιος σπρώχνει ένα βαρύ πιάνο χωρίς να καταφέρει να το μετακινήσει. Ποιες δυνάμεις ασκούνται στο πιάνο;

3.27. Η σχέση $0 \leq T_\sigma \leq \mu_\sigma F_\kappa$ αναφέρεται στη στατική τριβή. Τι ακριβώς εκφράζει;

3.28. Ποια είναι η κατεύθυνση της τριβής ολίσθησης;

3.29. Πότε εμφανίζεται τριβή ολίσθησης; Πώς διατυπώνονται οι εμπειρικοί νόμοι στους οποίους υπακούει η τιμή της; Ποια είναι η εξίσωση με την οποία εκφράζονται οι νόμοι αυτοί;

3.30. Ένα σημειακό αντικείμενο εκτελεί ομαλή κυκλική κίνηση. Περιγράψτε τη συνισταμένη όλων των δυνάμεων που ασκούνται σ' αυτό.

3.31. Ποιές είναι οι αναγκαίες προϋποθέσεις ώστε να εκτελέσει ένα σώμα ομαλή κυκλική κίνηση; Πώς δημιουργούνται οι προϋποθέσεις αυτές όταν ένα αυτοκίνητο παίρνει στροφή α) σε οριζόντιο οδόστρωμα; β) σε υπερυψωμένο οδόστρωμα;

3.32. Από τη διανυσματική εξίσωση $\vec{F} = m\vec{\alpha}$ για τη μελέτη της ομαλής κυκλικής κίνησης μπορούμε να πάρουμε τις δύο αλγεβρικές εξισώσεις $\Sigma F_R = m\alpha_\kappa$ και $\Sigma F_y = 0$. Ποιες προϋποθέσεις απαιτούνται; Τι παριστάνει κάθε σύμβολο;

3.33. Στην ομαλή κυκλική κίνηση ενός αντικειμένου ισχύει η σχέση $\Sigma F = mu^2/R$.
Τι παριστάνουν τα σύμβολα; Πώς αποδεικνύεται αυτή η σχέση;

3.34. Τί ακριβώς ισχυρίστηκε ο Κοπέρνικος στο ένα και μοναδικό βιβλίο του;

3.35. Πώς αντιμετωπίστηκε η άποψη του Κοπέρνικου; Πώς θα διατυπώνατε την πρότασή του στη γλώσσα της φυσικής;

3.36. Ποια ήταν η άποψη του Κέπλερ για το ηλιακό σύστημα;

3.37. Ποια ήταν τα ερωτήματα που αντιμετώπισε ο Νεύτων όταν παρενέβη στον διάλογο για το ηλιακό σύστημα; Ποια ήταν η άποψή του για το ζήτημα της έννοιας *βάρος;* Σε τι διέφερε από την παραδοσιακή άποψη;

3.38. Ο Νεύτων υποστήριξε ότι η δύναμη που αναγκάζει το φεγγάρι να περιφέρεται γύρω από τη Γη, ίσως να οφείλεται στη Γη και να είναι δύναμη βαρύτητας. Πού βασίστηκε;

3.39. Πώς διατυπώνεται ο νόμος της Παγκόσμιας έλξης α) με λέξεις β) με σύμβολα; Τι παριστάνει κάθε σύμβολο; Πώς επαληθεύτηκε πειραματικά;

3.40. α) Από τι εξαρτάται η τιμή της βαρυτικής επιτάχυνσης στην επιφάνεια ενός πλανήτη; Δικαιολογήστε την απάντηση βασιζόμενοι σε νόμους της φυσικής.
β) Καθώς ένα αντικείμενο απομακρύνεται από τη Γη, το βάρος του διαρκώς ελαττώνεται. Ποια είναι ακριβώς η σχέση του βάρους με την απόσταση από το κέντρο της Γης;

3.41. Στο βιβλίο του *Principia* ο Νεύτων περιγράφει με ένα «νοητικό πείραμα» τη δορυφοροποίηση μιας πέτρας. Ποιοι ήταν οι συλλογισμοί του;

3.42. Για κάθε ύψος πάνω από τη Γη υπάρχει μόνο μία τιμή της ταχύτητας για τη δορυφοροποίηση ενός αντικειμένου σε ομαλή κυκλική κίνηση. Γιατί; Από τι εξαρτάται η τιμή αυτής της ταχύτητας; Δικαιολογήστε την απάντηση.

3.43. Τι λέγεται *ορμή υλικού σημείου;* Τι λέγεται *ορμή συστήματος;* Πώς διατυπώνεται η αρχή διατήρηση της ορμής; Πώς μπορούμε, βασιζόμενοι στους νευτωνικούς νόμους της κίνησης να καταλήξουμε στην αρχή της διατήρησης της ορμής;

3.44. Καθώς το όπλο εκπυρσοκροτεί εκτινάσσεται προς την αντίθετη κατεύθυνση. Το φαινόμενο λέγεται ανάκρουση. Από τι εξαρτάται η ταχύτητα της ανάκρουσης; Πώς μπορούμε να απαντήσουμε βασιζόμενοι στην αρχή της διατήρησης της ορμής;

3.45. Περιγράψτε τρία γεγονότα η εξέλιξη των οποίων μπορεί να προβλεφθεί βάσει της αρχής της διατήρησης της ορμής.



Να αναρωτηθούμε...

3.46. Ποια από τα παρακάτω αντικείμενα εκδηλώνουν ελαστικότητα σχήματος;

ένα κομμάτι πλαστελίνης	ένα μπαλάκι του τένις
ένα κομμάτι αφρολέξ	ένα ελατήριο
μία ατσάλινη σφαίρα	ένα λάστιχο

3.47. Σύμφωνα με τον νόμο του Hooke οι .... παραμορφώσεις είναι .... προς τις αιτίες οι οποίες τις προκαλούν. Ειδικά για την επιμήκυνση ενός ελατηρίου ο νόμος διατυπώνεται από την εξίσωση $F = k\,\Delta\ell$ στην οποία το F παριστάνει την ασκούμενη στο ελατήριο δύναμη, το k .... και το $\Delta\ell$ .... του ελατηρίου.

Σας ζητούμε να συμπληρώσετε τα κενά.

3.48. Δύο δυνάμεις F_1 = 1,6 N και F_2 = 0,4 N με .... κατευθύνσεις .... στο ίδιο αντικείμενο έτσι ώστε η συνισταμένη τους να είναι ίση με 1,2 N και να έχει την ίδια κατεύθυνση με την ....

Σας ζητούμε να συμπληρώσετε τα κενά.

3.49. Ποιες από τις ακόλουθες προτάσεις δεν είναι σύμφωνες με την αριστοτελική φυσική;

α) Μια πέτρα πέφτει προς τα κάτω με σταθερή ταχύτητα που καθορίζεται από το βάρος της.

β) Η Γη ασκεί ελκτική δύναμη στη Σελήνη.

γ) Πάνω σε οριζόντια κινούμενο βέλος ενεργεί μόνο το βάρος του (Αντίσταση αέρα αμελητέα).

3.50. Μια δύναμη F αναλύεται σε δύο κάθετες συνιστώσες F_x και F_y. Αν είναι θ η γωνία των F_x και F

α) $F>F_x$ β) $F<F_y$ γ) $F_x = F ημθ$

δ) $F^2 = F_x^2 + F_y^2$ ε) $F_y = F ημθ$ στ) $F_x = F συνθ$

Με ποια από αυτά συμφωνείτε;

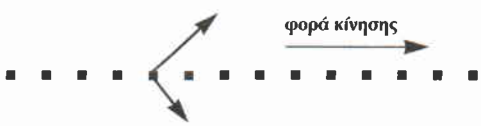
3.51. Ο αλεξιπτωστής πέφτει με σταθερή ταχύτητα. Στο σύστημα «άνθρωπος-αλεξίπτωτο» ασκούνται η δύναμη βάρος (Β) και μια δύναμη (F) από τον αέρα.

α) Η F είναι κατακόρυφη β) Β>F

γ) Η F διατηρείται σταθερή δ) F = B

Με ποια από αυτά συμφωνείτε; Δικαιολογήστε την απάντηση.

3.52. Μια μικρή σφαίρα κινείται με σταθερή ταχύτητα. Στη σφαίρα ασκούνται συνεχώς τρεις σταθερές δυνάμεις. Στο παρακάτω σχήμα σχεδιάζονται μόνο δύο απ' αυτές.

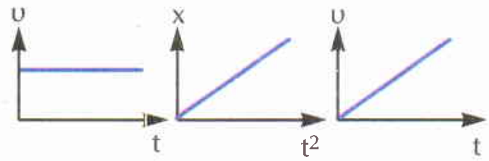


Σχεδιάστε την τρίτη δύναμη. Δικαιολογήστε την απάντησή σας.

3.53. Ένα σημειακό αντικείμενο ακινητεί υπό την επίδραση τριών δυνάμεων. Οι δύο απ' αυτές έχουν ίσα μέτρα και σχηματίζουν γωνία 120 μοιρών. Να κάνετε ένα σχήμα και να σημειώσετε τις τρεις αυτές δυνάμεις.

3.54. Μπορεί ένα σώμα, σε κάποια στιγμή, παρόλο που δέχεται δύναμη (συνισταμένη) να μην έχει ταχύτητα; Είναι δυνατόν να έχει ταχύτητα ενώ η δύναμη (συνισταμένη) θα είναι μηδέν; Δώστε ένα παράδειγμα για κάθε περίπτωση.

3.55. Σ' ένα αρχικά ακίνητο σώμα ασκείται σταθερή (συνισταμένη) δύναμη.



Ποιες από τις παραπάνω γραφικές παραστάσεις είναι αδύνατον να περιγράφουν την εξέλιξη της κίνησής του; Το x παριστάνει τη θέση του αντικειμένου και το υ την ταχύτητά του.

3.56. Η επιτάχυνση ενός σώματος σε κάποια χρονική στιγμή καθορίζεται:

α) από την ταχύτητα, από τη μάζα του σώματος και από τη συνισταμένη των ασκουμένων στο σώμα δυνάμεων

β) μόνο από τη συνισταμένη των ασκουμένων στο σώμα δυνάμεων

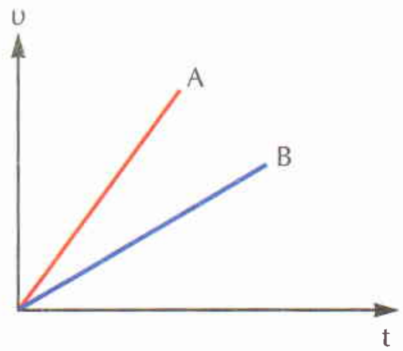
γ) από τη μάζα του σώματος και από τη συνισταμένη των δυνάμεων

δ) από την ταχύτητα και από τη μάζα του σώματος.

Με ποιο από αυτά συμφωνείτε;

3.57. Σε ένα αρχικά ακίνητο αντικείμενο $Σ_1$ ασκείται (συνισταμένη) δύναμη F οπότε η

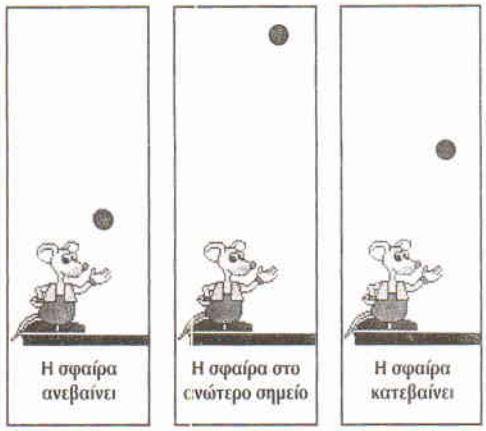
ταχύτητά του αυξάνει σύμφωνα με τη γραφική παράσταση Α. Μια δύναμη ίση με την F ασκείται σε ένα άλλο αντικείμενο Σ_2 και η ταχύτητά του αυξάνει σύμφωνα με τη γραφική παράσταση Β η οποία εμφανίζεται σε κοινό διάγραμμα με την προηγούμενη.



Σας ζητούμε να συγκρίνετε τις μάζες των δύο αντικειμένων και να δικαιολογήσετε την άποψή σας.

3.58. Η μάζα ενός σώματος
α) εξαρτάται από την τιμή της βαρυτικής επιτάχυνσης του τόπου
β) έχει ως μονάδα μετρήσεως το 1N
γ) αποτελεί το μέτρο της αδράνειάς του
δ) είναι ίση με το γινόμενο του βάρους επί την επιτάχυνση της βαρύτητας
ε) έχει την ίδια τιμή σε οποιοδήποτε ύψος από το έδαφος.
Με ποια από αυτά συμφωνείτε;

3.59. Υποτίθεται ότι το ποντίκι εκτοξεύει τη σφαίρα κατακόρυφα προς τα πάνω. Σε καθένα από τα τρία σχήματα παριστάνεται η σφαίρα σε τρεις διαφορετικές στιγμές της κίνησης. Σας ζητούμε να σημειώσετε τις δυνάμεις που ασκούνται στη σφαίρα στις τρεις αυτές χρονικές στιγμές. Να αγνοήσετε την αντίσταση του αέρα.



3.60. Από τις παρακάτω λέξεις και εξισώσεις να διαλέξετε τις κατάλληλες ώστε να γεμίσουν τα κενά του κειμένου:
ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ • $h = 1/2\ gt$ • ΚΕΝΟΥ • ΜΕΓΑΛΥΤΕΡΗ ΑΠΟ • ΙΣΗ ΜΕ • $h = 1/2\ gt^2$ • ΜΑΖΑ ΤΟΥ • ΜΙΚΡΟΤΕΡΗ ΑΠΟ • ΕΛΕΥΘΕΡΗ • ΒΑΡΙΔΙ • ΤΡΙΤΟ • ΠΡΩΤΟ • ΔΕΥΤΕΡΟ • ΙΣΕΣ.

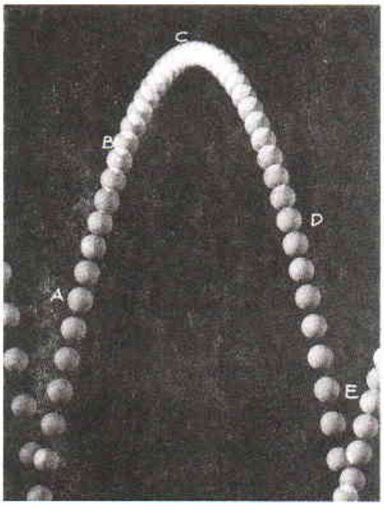
Ένα βαρίδι και ένα κεράσι αφήνονται από το ίδιο ύψος και εκτελούν .... πτώση μέσα σε σωλήνα .... Το βαρίδι είναι 10 φορές βαρύτερο από το κεράσι. Η δύναμη που ασκεί ο πλανήτης Γη στο κεράσι είναι .... αυτή που ασκεί στο .... Η επιτάχυνση του βαριδιού είναι .... την επιτάχυνση του κερασιού. Η μάζα του βαριδιού είναι .... από τη μάζα του κερασιού. Η θέση του κερασιού κατά την πτώση δίνεται από την εξίσωση .... Μολονότι οι ασκούμενες στα δύο σώματα δυνάμεις είναι .... οι επιταχύνσεις τους είναι .... διότι σύμφωνα με τον .... νόμο του Νεύτωνα η επιτάχυνση ενός σώματος καθορίζεται και από τη ....

3.61. Αν ο χρυσός πουλιόταν με το βάρος, πού θα ήταν πιο συμφέρον να τον αγορά-

σουμε, στη Στοκχόλμη ή στην Καβάλα; Αν πουλιέται σε μάζα, θα είχε καμιά διαφορά;

3.62. Με ποιες από τις παρακάτω προτάσεις συμφωνείτε;
α) Το βάρος ενός σώματος είναι ίσο με το γινόμενο της μάζας του επί τη βαρυτική επιτάχυνση.
β) Η τιμή της βαρυτικής επιτάχυνσης εξαρτάται από το βάρος του σώματος.
γ) Ο λόγος των μαζών δύο σωμάτων είναι ίσος με το λόγο των βαρών.

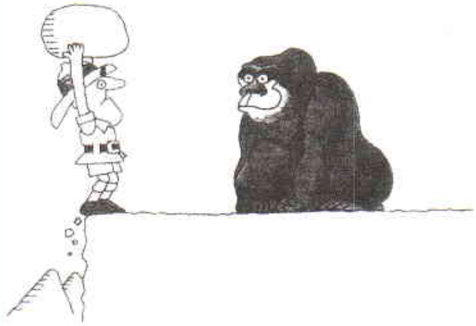
3.63. Μια μικρή σφαίρα αναπηδώντας στο έδαφος διαγράφει την τροχιά του σχήματος. Σχεδιάστε τις δυνάμεις που ασκούνται στη σφαίρα όταν διέρχεται από τις θέσεις A, B, C, D και E. Αγνοήστε την αντίσταση του αέρα.



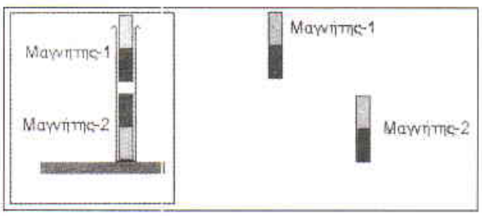
3.64. Ένα κιβώτιο βάρους 60 N βρίσκεται μέσα σε ασανσέρ το οποίο ανεβαίνει με σταθερή ταχύτητα.
α) Η δύναμη την οποία ασκεί το κιβώτιο στο δάπεδο είναι το βάρος του κιβωτίου.
β) Η δύναμη την οποία ασκεί το κιβώτιο στο δάπεδο είναι ίση με 60 N.
γ) Η δύναμη την οποία ασκεί το δάπεδο στο κιβώτιο είναι ίση (κατά μέτρο) με τη δύναμη που ασκεί το κιβώτιο στο δάπεδο, ανεξάρτητα από το *πώς* κινείται το ασανσέρ.
δ) Η δύναμη την οποία ασκεί το δάπεδο στο κιβώτιο είναι ίση (κατά μέτρο) με το βάρος του κιβωτίου.
ε) Η δύναμη την οποία ασκεί το δάπεδο στο κιβώτιο είναι μεγαλύτερη από 60 N.
Με ποια απ' αυτά συμφωνείτε;

3.65. Ένας βαρκάρης βρίσκεται μέσα σε βάρκα, δεμένη σε κάποια απόσταση από την προκυμαία. Τραβώντας το σκοινί θα καταφέρει να πλησιάσει την προκυμαία και να βγει έξω. Πώς το εξηγείτε;

3.66. Συζητήστε αυτό που προβλέπετε να συμβεί στον εξερευνητή, χρησιμοποιώντας και τη γλώσσα της φυσικής.



3.67. Σε κατακόρυφο σωλήνα τοποθετούνται δύο ραβδόμορφοι μαγνήτες οι οποίοι ισορροπούν όπως στο σχήμα.

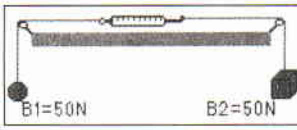


α) Σχεδιάστε τις δυνάμεις που ασκούνται στο κάθε μαγνήτη χωριστά.
β) Αν το βάρος κάθε μαγνήτη είναι B, πόση είναι η δύναμη που ασκείται στο πυθ-

μένα του σωλήνα;
Δικαιολογήστε την απάντηση.

3.68. Ένας μικρός κύβος ολισθαίνει σε οριζόντιο τραπέζι με σταθερή ταχύτητα. Θεωρώντας την τριβή αμελητέα να σημειώσετε τις δυνάμεις που ασκούνται στον κύβο.

3.69. Ποια είναι η ένδειξη του δυναμομέτρου;



Δικαιολογήστε την απάντησή σας.

3.70. Ένα φλιτζάνι ζυγίζει 3 N και βρίσκεται πάνω στο τραπέζι. Ο συντελεστής στατικής τριβής είναι 0,4. Η στατική τριβή την οποία ασκεί το τραπέζι στο φλιτζάνι
α) είναι δυνατόν, κάτω από προϋποθέσεις, να είναι 1 N
β) είναι δυνατόν, κάτω από προϋποθέσεις, να είναι 1,5 N
γ) είναι δυνατόν, κάτω από προϋποθέσεις, να είναι μηδέν
δ) είναι ίση με 1,2 N όταν επίκειται ολίσθηση
ε) είναι ίση –κατά μέτρο– με τη στατική τριβή που ασκεί το φλιτζάνι στο τραπέζι.
Με ποια από αυτά συμφωνείτε;

3.71. Ένα βαρύ κιβώτιο ολισθαίνει προς τα κάτω σε κεκλιμένο επίπεδο. Αν είναι Β το βάρος του, Τ η τριβή ολίσθησης, θ η γωνία του κεκλιμένου επιπέδου, μ ο συντελεστής τριβής και $F_κ$ η ασκούμενη κάθετη αντίδραση.
α) $Τ = Βημθ$ β) $Τ = μΒσυνθ$ γ) $F_κ = Βημθ$
δ) $Τ = μF_κ$ ε) $Τ < Βημθ$ στ) $Τ = μΒημθ$
Με ποια από αυτά συμφωνείτε;

3.72. Κατά την ομαλή κυκλική κίνηση ενός αντικειμένου η κεντρομόλος δύναμη
α) είναι η συνισταμένη όλων των δυνάμεων που ασκούνται στο αντικείμενο
β) διατηρείται σταθερή
γ) έχει κατεύθυνση προς το κέντρο της τροχιάς
δ) είναι συνεχώς κάθετη στην ταχύτητα του αντικειμένου
ε) είναι ίση με το γινόμενο της μάζας επί την ταχύτητα προς την ακτίνα της τροχιάς
στ) είναι μια δύναμη την οποία ασκεί το αντικείμενο σε σώμα του περιβάλλοντος
ζ) έχει ως αποτέλεσμα τη μεταβολή στην κατεύθυνση της ταχύτητας
η) έχει ως αποτέλεσμα τη μεταβολή της ταχύτητας
θ) είναι ίση με το γινόμενο της μάζας επί την επιτάχυνση του κινητού.
Με ποια από αυτά συμφωνείτε;

3.73. Σας ζητούμε να σχολιάσετε το επόμενο σκίτσο.



3.74. Ας υποθέσουμε ότι βρισκόσαστε πάνω στην επιφάνεια του φεγγαριού μια μεγάλη παρέα και ένας από την παρέα ήταν ο κύριος που ποζάρει στην φωτογραφία.



α) Πιστεύετε ότι θα ήταν το ίδιο δύσκολο όσο και στη Γη να τον σηκώσετε ψηλότερα από το έδαφος;
β) Πιστεύετε ότι θα ήταν το ίδιο δύσκολο όσο και στη Γη να τον σπρώξετε με τα χέρια σας, αν τύχει να θυμώσετε μαζί του; Δικαιολογήστε τις απαντήσεις.

3.75. Τι θα συνέβαινε στη Σελήνη

α) Αν έπαυε να υπάρχει η παγκόσμια έλξη;

β) Αν σταματούσε να περιφέρεται γύρω απ' τη Γη;

3.76. Συχνά τα παιδιά ρωτούν «τι συγκρατεί το φεγγάρι στον ουρανό;» Τι απάντηση θα μπορούσατε να δώσετε;

3.77. Κατά την ομαλή κυκλική κίνηση ενός δορυφόρου γύρω από τη Γη

α) η επιτάχυνση του δορυφόρου είναι ίση με τη γήινη βαρυτική επιτάχυνση στο ύψος που βρίσκεται ο δορυφόρος

β) η επιτάχυνση του δορυφόρου είναι ίση με το τετράγωνο της ταχύτητάς του δια την ακτίνα της τροχιάς

γ) η ταχύτητα του δορυφόρου εξαρτάται από τη μάζα του δορυφόρου.

Με ποια από αυτά συμφωνείτε;

3.78. Τι είναι πιο δύσκολο να δορυφοροποιήσουμε, έναν αναπτήρα ή μια μοτοσικλέτα;

Υποτίθεται ότι οι δορυφοροποιήσεις θα γίνουν στο ίδιο ύψος από τη Γη. Δικαιολογήστε την απάντηση.

3.79. Το διαστημόπλοιο ενός αστροναύτη πλησιάζει σε ένα άγνωστο πλανήτη ο οποίος έχει ένα δορυφόρο. Ο αστροναύτης καταφέρνει να μετρήσει την ακτίνα του πλανήτη, την ακτίνα της κυκλικής τροχιάς του δορυφόρου και την περίοδο της περιφοράς του δορυφόρου. Ποια από τα παρακάτω μεγέθη θα μπορούσε να υπολογίσει, χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα των προηγούμενων μετρήσεων;

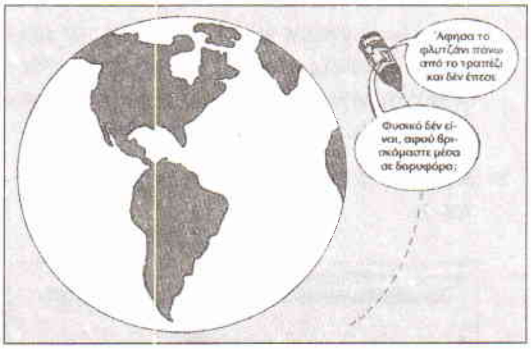
α) τη μάζα του πλανήτη

β) τη μάζα του δορυφόρου

γ) την ατμοσφαιρική πίεση στην επιφάνεια του πλανήτη

δ) την επιτάχυνση της βαρύτητας στην επιφάνεια του πλανήτη.

3.80. Δώστε μια εξήγηση στον διάλογο.



3.81. Ο γίγαντας και ο νάνος κάνουν πατινάζ στην ίδια πίστα. Σε κάποια στιγμή και ενώ είναι ακίνητοι ο γίγαντας δίνει στον νάνο μια σπρωξιά. Σας ζητούμε να συγκρίνετε:

α) τη δύναμη που ασκεί ο γίγαντας στον νάνο με τη δύναμη που ασκεί ο νάνος στον γίγαντα

β) την επιτάχυνση που αποκτά ο γίγαντας με την επιτάχυνση που αποκτά ο νάνος

γ) την ορμή που αποκτά ο γίγαντας με την ορμή που αποκτά ο νάνος.

Τριβές αμελητέες. Να δικαιολογήσετε τις απαντήσεις βασιζόμενοι σε φυσικούς νόμους.

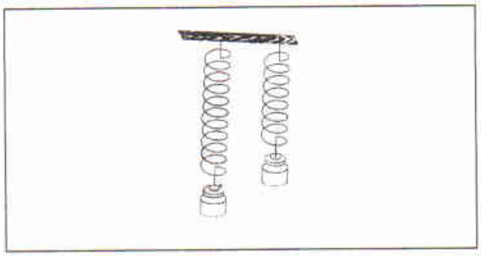
3.82. Ποιά από τα παρακάτω φαινόμενα θα μπορούσαμε να μελετήσουμε βασιζόμενοι και στην αρχή της διατήρησης της ορμής;

α) Ελεύθερη πτώση β) Ανάκρουση πυροβόλου γ) Κίνηση ενός δορυφόρου δ) Κίνηση πυραύλου ε) Κρούση ανάμεσα σε μπίλιες του μπιλιάρδου.



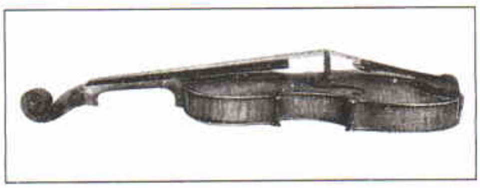
3.83. Η βαθμολόγηση ενός ελατηρίου έδωσε τα ακόλουθα αποτελέσματα:

Βάρος (σε N)	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0
Μήκος (σε mm)	48	54	60	66	72	78	84



α) Κατασκευάστε ένα διάγραμμα βάρους-μήκους ελατηρίου. Διαπιστώνετε αναλογία ανάμεσα στην αύξηση του βάρους και στην αντίστοιχη επιμήκυνση του ελατηρίου;
β) Η τοποθέτηση ενός σώματος στον δίσκο φέρνει τον δείχτη στην ένδειξη 67. Ποιο είναι το βάρος του σώματος; Ποια είναι η μάζα του;
γ) Ποια θα είναι η θέση του δείχτη αν τοποθετήσουμε στον δίσκο αντικείμενο μάζας 0.075 kg;

3.84. Ένα βιολί έχει τέσσερις τεντωμένες χορδές που στηρίζονται πάνω σ' έναν «ιππέα» όπως στο σχήμα. Η τάση κάθε χορδής είναι 80 N. Η γωνία που σχηματίζουν τα δύο τμήματα κάθε χορδής είναι 150°. Υπολογίστε τη δύναμη που ασκείται στον "ιππέα» από τις χορδές. Να θεωρήσετε γνωστό ότι συν 75° = 0,26.



3.85. Ένα αντικείμενο κινείται με σταθερή ταχύτητα ενώ ασκούνται σ' αυτό τρεις δυνάμεις. Η μία έχει την κατεύθυνση της ταχύτητας και μέτρο 2,2 N, η άλλη έχει μέτρο 3,7 N κατεύθυνση αντίθετη της ταχύτητας. Να προσδιορίσετε την τρίτη δύναμη που ασκείται στο αντικείμενο.

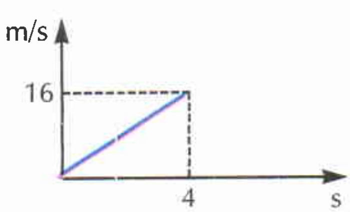
3.86. Σ' ένα μικρό κινούμενο αντικείμενο ασκούνται συνολικά τρεις σταθερές δυνάμεις. Οι δύο απ' αυτές έχουν την ίδια κατεύθυνση και μέτρα F_1 = 0,6 N και F_2 = 1,1 N αντίστοιχα. Η τρίτη έχει αντίθετη κατεύθυνση και μέτρο F_3 = 1,7 N. Το σώμα μέσα σε 3 δευτερόλεπτα μετατοπίζεται ευθύγραμμα κατά 24 μέτρα. Κατά πόσο θα μετατοπιστεί τα επόμενα 7 δευτερόλεπτα;

3.87. Σε ένα αρχικά ακίνητο αντικείμενο μάζας 0,2 kg ασκείται (συνισταμένη) δύναμη 0,8N. Σας ζητούμε να προσδιορίσετε α) την επιτάχυνσή του β) τη θέση του μετά 2 s.

3.88. Σε ένα αρχικά ακίνητο αντικείμενο ασκείται (συνισταμένη) δύναμη 4 N. Μετά από 2 s η ταχύτητα του αντικειμένου είναι 8 m/s. Σας ζητούμε να υπολογίσετε τη μάζα του αντικειμένου.

3.89. Σε ένα μικρό αντικείμενο, αρχικά ακίνητο, ασκείται σταθερή δύναμη (συνισταμένη) ίση με 0,4 N. Που θα βρίσκεται το αντικείμενο ύστερα από πέντε δευτερόλεπτα; Η μάζα του είναι 0,1 kg.

3.90. Κατά την ευθύγραμμη κίνηση ενός αντικειμένου μάζας 300g η ταχύτητά του μεταβάλλεται σύμφωνα με το γράφημα. Στο αντικείμενο ασκούνται δύο δυνάμεις.



Η μία έχει μέτρο 2,5 N και την κατεύθυνση της κίνησης.
Να προσδιορίσετε τα στοιχεία της άλλης.

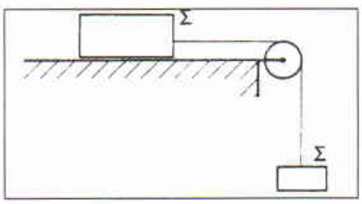
3.91. Κρεμάμε ένα σφαιρίδιο στο άκρο ενός δυναμόμετρου και διαβάζουμε την ένδειξη 3 N. Κάνουμε το ίδιο μέσα σε ανερχόμενο ασανσέρ και διαβάζουμε 3,2 N. Ποια είναι η επιτάχυνση του ασανσέρ;

3.92. Σε ένα κουτί μάζας 300 g το οποίο ακινητεί πάνω σε οριζόντιο τραπέζι ασκείται σταθερή οριζόντια δύναμη 2,5 N και το αντικείμενο κινείται με σταθερή επιτάχυνση 2 m/s. Υπάρχει τριβή; Δικαιολογήστε την απάντηση.

3.93. Ένα μικρό αντικείμενο αφήνεται πάνω σε κεκλιμένο επίπεδο και ολισθαίνει προς τα κάτω. Να προσδιορίσετε α) την επιτάχυνσή του και β) τη θέση του μετά από 1/10 του δευτερολέπτου. Η τριβή θεωρείται αμελητέα.

3.94. Δύο αντικείμενα με μάζες 520 g και 500 g αντίστοιχα προσδένονται στα άκρα ενός νήματος το οποίο διέρχεται από ακίνητη τροχαλία έτσι ώστε το ένα να κατέρχεται και το άλλο να ανέρχεται. Να προσδιορίσετε την επιτάχυνση κάθε αντικειμένου. Πόσες φορές είναι μικρότερη από την επιτάχυνση της ελεύθερης πτώσης;

3.95. Το σύστημα είναι αρχικά ακίνητο γιατί κάποιος το συγκρατεί. Όταν το σύστημα αφεθεί ελεύθερο το κουτί Σ′ κατέρχεται και σε ένα δευτερόλεπτο αποκτά ταχύτητα 1,2 m/s.



Σας ζητούμε να προσδιορίσετε
α) την επιτάχυνση του Σ′, β) τη δύναμη που ασκεί το τεντωμένο νήμα στο Σ′ και γ) το βάρος του Σ.
Η μάζα του Σ′ είναι 150 γραμμάρια. Τριβή αμελητέα.

3.96. Κάποιος σπρώχνει το κιβώτιο Σ_1 ασκώντας οριζόντια δύναμη 0,6N. Να προσδιορίσετε
α) την κοινή επιτάχυνση των δύο κιβωτίων
β) τη δύναμη την οποία ασκεί το κιβώτιο Σ_1 στο Σ_2.
γ) τη δύναμη την οποία ασκεί το Σ_2 στο Σ_1.
Οι μάζες των Σ_1 και Σ_2 είναι αντίστοιχα 200 g και 100 g. Η τριβή θεωρείται αμελητέα.





3.97. Το κορίτσι είναι 52 κιλά και βρίσκεται μέσα στο ασανσέρ πάνω σε ζυγαριά.
Σας ζητούμε να προσδιορίσετε τη δύναμη που ασκεί στη ζυγαριά όταν το ασανσέρ
α) κατεβαίνει με σταθερή ταχύτητα, β) κατεβαίνει με επιτάχυνση 2 m/s^2, γ) ανεβαίνει με σταθερή ταχύτητα.

3.98. Ένα αντικείμενο Σ σε σχήμα κύβου έχει βάρος 10N και βρίσκεται πάνω σε αμετακίνητη βάση με οριζόντια επιφάνεια. Με πόση οριζόντια δύναμη πρέπει να το σπρώξουμε ώστε να το μετακινήσουμε στις περιπτώσεις που α) το Σ είναι ατσάλινο και η βάση από ατσάλι β) το Σ είναι από αλουμίνιο και η βάση από ατσάλι γ) το Σ είναι ατσάλινο και η βάση από αλουμίνιο δ) το Σ είναι γυάλινο και η βάση από γυαλί ε) το Σ είναι από λάστιχο και η βάση από μπετόν (Αναζητήστε τους συντελεστές στατικής τριβής στο σχετικό κεφάλαιο του βιβλίου).

3.99. Στα κόμικς, ο Σούπερμαν καταφέρνει να σταματήσει ένα φορτηγό μεγάλης ταχύτητας, τεντώνοντας το χέρι του και μένοντας ακίνητος προτού καν αυτό φτάσει στο σώμα του. Δείξτε ότι αυτό δεν μπορεί να είναι σύμφωνο με τους φυσικούς νόμους και ότι όσες μυικές δυνατότητες και να διαθέτει, η δύναμη που ασκεί μένοντας ακίνητος, δεν μπορεί να ξεπεράσει τη μέγιστη τριβή ανάμεσα στα πόδια του και στο έδαφος.

3.100. Ποια πρέπει να είναι η τιμή της οριζόντιας δύναμης που πρέπει να ασκεί κανείς σ' ένα κύβο 2 kg ώστε να συγκρατείται στον τοίχο; Ο συντελεστής τριβής είναι 0,4.

3.101. Σε ένα αντικείμενο μάζας 400 g το οποίο βρίσκεται σε οριζόντια επιφάνεια ασκείται οριζόντια δύναμη 1,8 N. Μετά από δύο δευτερόλεπτα το αντικείμενο βρέθηκε σε απόσταση ενός μέτρου από την αρχική του θέση. Σας ζητούμε να προσδιορίσετε α) την επιτάχυνση του αντικειμένου β) την τιμή της τριβής η οποία ασκήθηκε σ' αυτό γ) τον συντελεστή τριβής ολίσθησης.

3.102. Ένα μικρό κουτί βρίσκεται σε κεκλιμένο επίπεδο γωνίας 45 μοιρών και ολισθαίνει προς τα κάτω με σταθερή επιτάχυνση $3 m/s^2$. Σας ζητούμε να προσδιορίσετε τον συντελεστή τριβής ολίσθησης.

3.103. Ένα αυτοκίνητο 1200 kg παίρνει στροφή σε οριζόντιο οδόστρωμα με ταχύτητα 54 km/h. Η ακτίνα του τόξου είναι 60 μέτρα. Η στατική τριβή θα λειτουργήσει ως κεντρομόλος δύναμη. Πόση θα είναι η τιμή της;

3.104. Ένα αντικείμενο 0,5 kg κινείται κυκλικά με ταχύτητα 4 m/s και διαπιστώνεται ότι η συνισταμένη των δυνάμεων που ασκούνται σ' αυτό είναι 8 N. Να υπολογίσετε την ακτίνα της τροχιάς και την περίοδο της ομαλής κυκλικής κίνησης.

3.105. Ένα μικρό σφαιρίδιο κινείται κυκλικά πάνω σ' ένα τραπέζι, δεμένο στο άκρο ενός δυναμόμετρου το άλλο άκρο του οποίου προσδένεται σε μικρό κατακόρυφα στερεωμένο καρφί στην επιφάνεια του τραπεζιού. Διαπιστώνεται ότι το δυναμόμετρο δείχνει διαρκώς 3 N ενώ το σφαιρίδιο κάνει 10 κύκλους σε 16 δευτερόλεπτα. Να υπολογίσετε την ταχύτητα του σφαιριδίου και τη μάζα του. Η ακτίνα του κύκλου της κυκλικής τροχιάς είναι 30 εκατοστόμετρα και η τριβή θεωρείται αμελητέα.

3.106. Ένα σφαιρίδιο 200 g κινείται κυκλικά σε κατακόρυφο επίπεδο στο άκρο τεντωμένου νήματος 30 cm. Σε ποιες θέσεις η συνισταμένη των ασκουμένων στο σφαιρίδιο δυνάμεων είναι ίση με το γινόμενο της μάζας του σφαιριδίου επί την κεντρομόλο επιτάχυνσή του;
Σας ζητούμε να προσδιορίσετε τη δύναμη που ασκεί το σφαιρίδιο στο νήμα όταν το σφαιρίδιο διέρχεται από την ανώτερη θέση με ταχύτητα 0,5 m/s.

3.107. Το ένα άκρο νήματος 80 cm προσδένεται σε οροφή. Στο άλλο άκρο προσδένεται ένα αντικείμενο το οποίο ενεργοποιείται έτσι ώστε να εκτελεί ομαλή κυκλική κίνηση σε οριζόντιο κύκλο καθώς το τεντωμένο νήμα θα διαγράφει κωνική επιφάνεια και η γωνία του νήματος με την κατακόρυφο θα είναι διαρκώς ίση με 30 μοίρες. Σας ζητούμε να υπολογίσετε πόσο χρόνο θα χρειάζεται το αντικείμενο για να συμπληρώνει μια περιστροφή.

3.108. Σε ύψος 300 χιλιομέτρων από την επιφάνεια της Γης η βαρυτική επιτάχυνση

είναι 8,93 m/s^2. Ποιο θα είναι το βάρος και η μάζα ενός τεχνητού δορυφόρου, ο οποίος στο έδαφος έχει βάρος 5000 N; Στην επιφάνεια της Γης η βαρυτική επιτάχυνση να θεωρηθεί 9,81 m/s^2.

3.109. Αν είναι R η ακτίνα της Γης, το βάρος μιας γυναίκας σε «ύψος» R από την επιφάνεια της Γης είναι 140 N. Πόσο είναι το βάρος της α) στην επιφάνεια της Γης; β) σε απόσταση 30R από το κέντρο του πλανήτη μας; Πόση είναι η μάζα της;

3.110. Σας ζητούμε να υπολογίσετε τη μάζα της Γης βασιζόμενοι στα παρακάτω στοιχεία:
α) Η βαρυτική επιτάχυνση στην επιφάνεια της Γης είναι 9,8 m/s^2.
β) Το τόξο από τον Βόρειο Πόλο μέχρι τον Ισημερινό είναι 10.000 χιλιόμετρα.
γ) Η σταθερά της παγκόσμιας έλξης είναι $6{,}67\ 10^{-11}$ N m^2 kg^{-2}.
Η Γη να θεωρηθεί σφαιρικό σώμα.

3.111. Ένα αντικείμενο βρίσκεται σε ύψος 630 χιλιομέτρων από τη γήινη επιφάνεια. Με ποια ταχύτητα πρέπει να εκτοξευθεί ώστε να γίνει δορυφόρος σε κυκλική τροχιά; Σε πόσο χρόνο θα συμπληρώνει μια περιφέρεια; Δίνεται η μάζα της Γης $6\ 10^{24}$ kg, η ακτίνα της Γης 6370 χιλιόμετρα και η σταθερά της παγκόσμιας έλξης $6{,}67\ 10^{-11}$ N m^2 kg^{-2}.

3.112. Βασιζόμενοι α) στον νόμο της παγκόσμιας έλξης, β) στον δεύτερο νόμο της κίνησης, γ) στην εξίσωση για την κεντρομόλο επιτάχυνση, δ) στη σχέση της ταχύτητας, ακτίνας τροχιάς και περιόδου σε μια ομαλή κυκλική κίνηση και αποδεχόμενοι ότι οι τροχιές των πλανητών γύρω από τον Ήλιο είναι κυκλικές, σας ζητούμε να αποδείξετε ότι τα τετράγωνα των περιόδων των πλανητών είναι ανάλογα προς τους κύβους των αποστάσεών τους από τον Ήλιο.

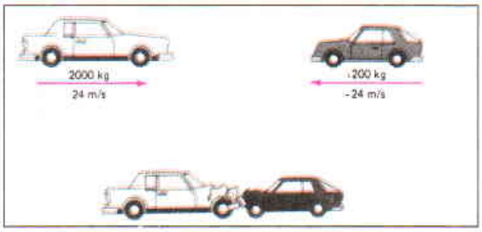
3.113. Δύο αντικείμενα ίσων μαζών στα οποία η μόνη ασκούμενη δύναμη είναι η μεταξύ τους παγκόσμια έλξη εκτελούν ομαλή κυκλική κίνηση στην ίδια τροχιά. Σας ζητούμε, βασιζόμενοι στους φυσικούς νόμους α) να αποδείξετε ότι τα δύο αντικείμενα πρέπει να βρίσκονται διαρκώς στα άκρα μιας διαμέτρου, β) να υπολογίσετε την ταχύτητα καθενός με βάση τη μάζα καθενός και την ακτίνα του κύκλου. Θεωρείται γνωστή η τιμή της σταθεράς της παγκόσμιας έλξης.

3.114. Με βάση τον αρχικό ορισμό της μονάδας *1 μέτρο* η περιφέρεια της Γης είναι 40.000 χιλιόμετρα οπότε σύμφωνα με τη Γεωμετρία –θεωρώντας τον πλανήτη μας σφαιρικό αντικείμενο– η ακτίνα R της Γης είναι $40000/2\pi = 6370$ χιλιόμετρα περίπου. Έχει επίσης υπολογιστεί ότι η απόσταση της Γης από τη Σελήνη είναι 60 R. Με βάση αυτά τα στοιχεία
α) Να θεωρήσετε γνωστό ότι η περίοδος της περιφοράς της Σελήνης είναι 27,33 ημέρες και να υπολογίσετε την ταχύτητα της Σελήνης κατά την περιφορά της γύρω από τη Γη. Βασιζόμενοι στην τιμή της ταχύτητας μπορούμε να υπολογίσουμε ότι η κεντρομόλος επιτάχυνση της Σελήνης είναι 0,27 cm/s^2. Πώς το υπολογίζουμε;
β) Η βαρυτική επιτάχυνση στην επιφάνεια της Γης είναι $g_0 = 9{,}81\ m/s^2$. Αποδεχόμενοι ότι ισχύει ο νόμος της παγκόσμιας έλξης συμπεραίνουμε ότι η γήινη βαρυτική επιτάχυνση ελαττώνεται σύμφωνα με τη σχέση $g = g_0\ R^2/d^2$ όπου d η απόσταση από το κέντρο της Γης. Πώς αποδεικνύεται αυτή η σχέση;
Βασιζόμενοι σ' αυτήν μπορούμε να υπολογίσουμε ότι η τιμή της βαρυτικής επιτάχυνσης σε απόσταση 60 R από το κέντρο

της Γης είναι 0,27 cm/s^2. Πώς το υπολογίζουμε;

γ) Αποδεχόμενοι, συνεπώς, ότι ισχύει ο νόμος της παγκόσμιας έλξης διαπιστώνουμε ότι η γήινη βαρυτική επιτάχυνση στην περιοχή όπου βρίσκεται η Σελήνη είναι ίση με την κεντρομόλο επιτάχυνση της Σελήνης. Σας ζητούμε να το σχολιάσετε.

3.115. Τα δύο αυτοκίνητα κινούνται αντίθετα όπως στο σχήμα και συγκρούονται.



Ποια ταχύτητα θα έχει το σύστημα ακριβώς μετά τη σύγκρουση;

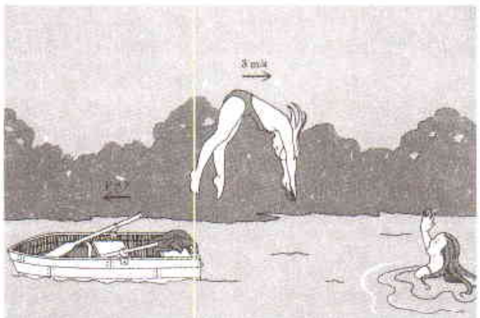
3.116. Ένα σφαιρίδιο μάζας 300 g κινούμενο με ταχύτητα 4 m/s προσπίπτει σε ακίνητο σφαιρίδιο μάζας 100 g το οποίο αρχίζει να κινείται με ταχύτητα 3 m/s. Σας ζητούμε να προσδιορίσετε την ταχύτητα του μεγαλύτερου σφαιριδίου μετά τη σύγκρουση.

3.117. Δύο μπίλιες, η μία (M_1) μάζας 80 g και η άλλη (M_2) μάζας 50 g κινούνται η μία προς την άλλη με αντίθετες κατευθύνσεις και με ταχύτητες οι οποίες έχουν μέτρα 4 m/s και 2 m/s αντίστοιχα. Μετά τη σύγκρουση η M_1 συνεχίζει να κινείται προς την κατεύθυνση που είχε πριν από τη σύγκρουση με ταχύτητα 1,5 m/s. Να προσδιορίσετε την ταχύτητα της άλλης.

3.118. Ένα βλήμα 200 g κινούμενο οριζόντια με 140 m/s εκρήγνυται και διασπάται σε δύο κομμάτια μαζών 120 g και 80 g. Το μεγαλύτερο από τα δύο κινείται προς την ίδια κατεύθυνση (που είχε το βλήμα πριν από την έκρηξη) με ταχύτητα 200 m/s. Σας ζητούμε να προσδιορίσετε την ταχύτητα του άλλου κομματιού.

3.119. Πάνω σε οριζόντιο διάδρομο ένα αντικείμενο M_1 κινούμενο με σταθερή ταχύτητα πλησιάζει προς ένα άλλο αντικείμενο M_2 με το οποίο συγκρούεται και συσσωματώνεται. Δύο δευτερόλεπτα πριν από τη σύγκρουση τα δύο αντικείμενα απείχαν κατά 8 μέτρα. Σας ζητούμε να προβλέψετε πόσο θα απέχουν δύο δευτερόλεπτα μετά τη σύγκρουση. Οι τριβές θεωρούνται αμελητέες. Η μάζα του M_1 είναι 1 kg ενώ η μάζα του M_2 είναι 600 g.

3.120. Η κοπέλα ήταν ακίνητη πάνω στη βάρκα και κάποια στιγμή δοκίμασε να κάνει βουτιά, οπότε η βάρκα μετακινήθηκε προς τα πίσω. Πως θα μπορούσε να το



είχε προβλέψει βασιζόμενη στους νόμους της φυσικής; Πόση είναι η ορμή της βάρκας; Πόση είναι η ταχύτητα της βάρκας; Η κοπέλα είναι 60 kg και η βάρκα 180 kg.

3.121. Δύο απολύτως όμοια καροτσάκια K_1 και K_2 βρίσκονται σε οριζόντιο τραπέζι. Ανάμεσά τους υπάρχει ένα συσπειρωμένο ελατήριο χωρίς να προσδένεται σε κανένα από αυτά αλλά τα καροτσάκια συγκρατούνται χάρη σ' ένα τεντωμένο νήμα που τα συνδέει. Κάθε καροτσάκι έχει μάζα 1

kg αλλά πάνω στο K_2 υπάρχει ένα αντικείμενο του οποίου τη μάζα θέλουμε να υπολογίσουμε. Κόβουμε το νήμα οπότε τα καροτσάκια σπρωγμένα από το ελατήριο κινούνται προς αντίθετες κατευθύνσεις. Διαπιστώνεται ότι τη στιγμή που το K_1 έχει μετακινηθεί κατά 120 cm, το K_2 έχει μετακινηθεί κατά 100 cm. Να υπολογίσετε τη μάζα του αντικειμένου. Η τριβή θεωρείται αμελητέα.

3.122. Ένα κανόνι είναι στερεωμένο στο δάπεδο ενός βαγονιού. Το βαγόνι αρχικά ηρεμεί, και μπορεί να κινείται χωρίς τριβές. Από το κανόνι εκτοξεύεται ένα βλήμα μάζας 5 kg με οριζόντια ταχύτητα 15 m/s ως προς το έδαφος. Η συνολική μάζα βαγονιού και κανονιού είναι 15.000 kg.

α) Ποιά ταχύτητα αποκτά το βαγόνι μετά την εκτόξευση;

β) Αν το βλήμα ενσφηνωθεί στο τοίχωμα ποια θα είναι η ταχύτητα του συστήματος μετά την ενσωμάτωση;

3.123. Μια σχεδία επιπλέει στο νερό ήρεμης θάλασσας. Έχει μήκος 8 m και μάζα 35 kg. Στο ένα της άκρο βρίσκεται όρθιος και ακίνητος ένας άνθρωπος βάρους 700 N ο οποίος σε κάποια στιγμή αρχίζει να μετακινείται προς το άλλο άκρο με σταθερή ταχύτητα. Σας ζητούμε να προβλέψετε κατά πόσο θα έχει μετακινηθεί η σχεδία όταν ο άνθρωπος φθάσει στο άκρο της. Η αντίσταση του νερού θεωρείται αμελητέα.

Ντοκουμέντο

Απόσπασμα από το βιβλίο *Η κόμη της Βερενίκης* του Γιώργου Γραμματικάκη

Η βαρυτική κατάρρευση που υπονομεύει διαρκώς τον αστρικό βίο, δεν αποτελεί εντούτοις το μόνο ενδεχόμενο. Στα πολύ μεγάλα αστέρια και μετά την έκρηξη του υπερκαινοφανούς, τον πυρήνα τους απειλεί μια νέα και δραματική αυτή την φορά, πιθανότητα: Η κατάρρευση της ίδιας της ύλης! Όταν το κατάλοιπο έχει πράγματι μάζα μερικές φορές μεγαλύτερη από αυτήν του Ήλιου, οι γραμμές άμυνάς του ως λευκού νάνου ή αστέρα νετρονίων είναι ανίσχυρες. Η βαρύτητα υπερνικά και τη φαινομενικά ασυμπίεστη σφαίρα των νετρονίων, που αρχίζουν έτσι να εφάπτονται μεταξύ τους. Η ύλη οδηγείται σε μια κατάσταση ουσιαστικής ανυπαρξίας. Κυριολεκτικά, αυτό που σχηματίζεται είναι μια μαύρη οπή. Μια καμπύλωση δηλαδή του χώρου και του χρόνου απ' όπου, λόγω του τεραστίου βαρυτικού πεδίου, κανένα σωμάτιο, αλλά μήτε το ίδιο το φως είναι δυνατόν να αποδράσει.

Η μαύρη οπή υποδηλώνει έτσι μια περιοχή του χώρου εξαιρετικά μικρή σε όγκο, όπου η τεράστια ύλη ενός θνήσκοντος αστέρος αυτοαναιρείται. Εντός της περιοχής αυτής –που χαρακτηριστικά καλείται και «ορίζοντας γεγονότων»– οποιοδήποτε συμβάν δεν έχει δυνατότητα να δηλώσει την παρουσία του στους απέξω. Το σήμα της πληροφορίας, οπτικό ή υλικό, θα έπρεπε τότε να υπερβεί την ταχύτητα του φωτός· και αυτό είναι ένα αξεπέραστο εμπόδιο. Εμπόδιο, μάλιστα, προς τη μια κατεύθυνση. Ένας άτυχος αστροναύτης θα μπορούσε, διαβαίνοντας τον ορίζοντα, να ευρεθεί μέσα στη μαύρη οπή. Ουδέποτε όμως θα μπορούσε στο εξής να διαφύγει. «Ανεπαισθήτως με έκλεισαν από τον κόσμο έξω» γράφει ο ποιητής. Τα υψηλά τείχη κτίζει στην περίπτωση αυτή το βαρυτικό πεδίο. Η ισχύς του γίνεται αντιληπτή από το ότι, αν ολόκληρη η Γη μας κατέληγε σε μαύρη οπή, το μέγεθός της δεν θα ήταν μεγαλύτερο από μια ασπιρίνη. Εν τούτοις, και σε απόσταση μισού μέτρου από αυτήν, ένας άνθρωπος θα είχε βάρος 100 δισεκατομμύρια φορές περισσότερο!

Οι μαύρες οπές αποτελούν μια αναπόδραστη πρόβλεψη της Γενικής Θεωρίας της Σχετικότητας. Όταν το θνήσκον αστέρι συμπιεσθεί σε διαστάσεις μικρότερες από τον ορίζοντα, καμιά δύναμη δεν μπορεί να συγκρατήσει τη διαδοχική συρρίκνωση και τελική κατάρρευση της ύλης σ' ένα μοναδικό σημείο· το αποκαλούμενο και «σημείο ανωμαλίας». Η ύλη αποκτά εκεί άπειρη πυκνότητα, και ακόμη άπειρη γίνεται η ισχύς του βαρυτικού πεδίου. Ο χώρος και ο χρόνος δεν υπάρχουν ως αυθύπαρκτες, χωριστές οντότητες και εν απουσία θεωρίας της Κβαντικής βαρύτητας, κάθε γνώση Φυσικής καταρρέει. Η ιδιόμορφη αυτή μαθηματική ανωμαλία στο κέντρο μιας μαύρης οπής, έχει το ανάλογό της στο σημείο μηδέν του χωρόχρονου, απ' όπου με τη Μεγάλη Έκρηξη εξεπορεύθη το Σύμπαν. Είναι αυτή η ανωμαλία, πιθανόν, η ακραία μορφή του απρόσιτου ή του αγνώ-

στου, η ακατανόητη σύμπτωση ιδιοτήτων της δημιουργίας και της καταστροφής.

Αν υπάρχει κάτι καθησυχαστικό, είναι ότι οι μαύρες οπές δεν ταξιδεύουν στο αχανές, καταπίνοντας την ύλη που θα προσεγγίσει τον ορίζοντά τους. Ενεδρεύουν απλώς σε περιοχές της μεσοαστρικής ύλης, μάρτυρες άφωνοι της εξαφανίσεως ενός μεγάλου άστρου. Την παρουσία τους δηλώνει μόνο το βαρυτικό πεδίο, όπως στην «Αλίκη στη χώρα των θαυμάτων» την αόρατη γάτα επρόδιδε απλώς το χαμόγελό της. Ο Ήλιος, αν θα γίνει μαύρη οπή, δεν θα διαταράξει καθόλου την τροχιά της Γης. Θα παύσει όμως να ανατέλλει!

Η υπέρβαση λοιπόν του ορίζοντα, οδηγεί ένα άστρο ή κάποιο περιφερόμενο σώμα πλανητικό, στον ανεπίστρεπτο δρόμο προς την ανωμαλία. Έτσι, ο άτυχος αστροναύτης που θα δοκιμάσει να εξερευνήσει μια μαύρη οπή, δεν βρίσκει απλώς τον δρόμο της επιστροφής κλειστό. Πριν αποσυντεθεί οριστικά, αισθάνεται το σώμα του να εκτείνεται καθ' ύψος, υπό την κατακλυσμική βαρυτική έλξη, και να αποκτά επιταχύνσεις ιλιγγιώδεις. Σαν ένας λόγος επιπρόσθετος στην ατυχία του, οι σύντροφοί του στο διαστημόπλοιο δεν πρόκειται ν' ανησυχήσουν. Διότι θα εξακολουθήσουν να τον βλέπουν στον ορίζοντα της μαύρης οπής, ακίνητο στον χώρο και με σταματημένη τη ροή του χρόνου του.

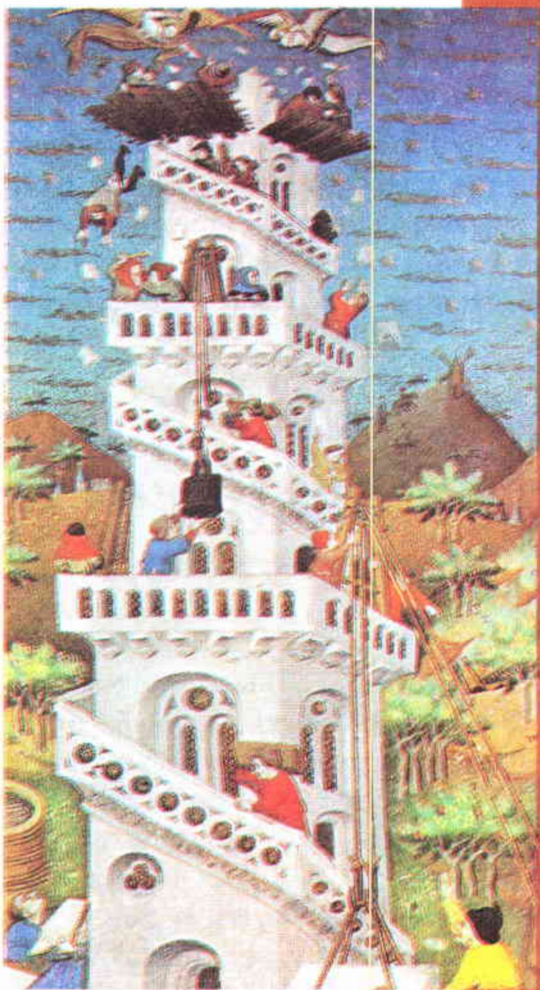
Ίσως, ωστόσο, ο αστροναύτης να αποδειχθεί λιγότερο άτυχος απ' ό,τι πίστευε· διότι, σύμφωνα με μια τολμηρή θεωρητική άποψη, η δίοδός του από την μαύρη οπή θα τον οδηγήσει σ' ένα άλλο σημείο του Σύμπαντος, αλλά εκατομμύρια χρόνια στο παρελθόν· ή, ακόμη καλύτερα, σ' ένα ολότελα διαφορετικό Σύμπαν.

Αν όμως φως δεν διαφεύγει από μια μαύρη οπή –αλλά αντίθετα, κάθε σώμα ή ακτινοβολία που θα περάσει από τον ορίζοντά της, απορροφάται ή αιχμαλωτίζεται για πάντα– γεννιέται το ερώτημα, πως μπορεί ν' ανιχνευθεί ένα παρόμοιο, κατ' όνομα μόνον αστρικό, σώμα. Η ανίχνευση αυτή γίνεται με έμμεσο τρόπο: Από τα ισχυρά βαρυτικά φαινόμενα που παρατηρούνται στη γειτονιά μιας μαύρης οπής ή τη μεγάλη έκλυση ενέργειας, που υποθέτουμε ότι συνοδεύει την επιταχυνόμενη κάθοδο μιας μάζας προς αυτήν. Μια σχεδόν αναμφισβήτητη μαύρη οπή έχει εντοπισθεί έτσι στον αστερισμό του Κύκνου, που απέχει 10.000 έτη φωτός από μας. Η μάζα της υπολογίζεται έξι φορές όσο η ηλιακή και είναι, πιθανότατα, ο αόρατος συνοδός ενός γιγαντιαίου αστέρα, που η κίνησή του δεν ερμηνεύεται με άλλον τρόπο. Το δίδυμο αυτό σύστημα αποτελεί μια ισχυρή πηγή εκπομπής ακτίνων Χ η ακτινοβολία παράγεται καθώς ύλη που εκτοξεύεται από τον αστέρα, οδεύει προς τη μαύρη οπή.

Σύμφωνα με κάποιες άλλες ενδείξεις, μια μαύρη οπή με μάζα δεκάδες χιλιάδες φορές μεγαλύτερη από αυτήν του Ήλιου ενεδρεύει στο κέντρο του Γαλαξία μας. Στην παρουσία της, ίσως, οφείλεται η εκπομπή ραδιοκυμάτων και υπέρυθρων ακτίνων, που παρατηρείται σε γειτονικές στο κέντρο του Γαλαξία περιοχές. Είναι ακόμη πιθανόν, παρόμοιες ή και μεγαλύτερες μαύρες οπές να υπάρχουν στο κέντρο των Κβάσαρς, των αινιγματικών αντικειμένων που ανιχνεύονται στα όρια του Σύμπαντος. Έτσι ερμηνεύεται ότι οι Κβάσαρς εκπέμπουν ακτινοβολία χίλιες φορές περισσότερη από όση ένας ολόκληρος γαλαξίας!

Σύμφωνα, τέλος, με μια υπόθεση του S. Hawking, το Σύμπαν είναι διάσπαρτο από μικρές μαύρες οπές που σχηματίσθηκαν κατά τη Μεγάλη Έκρηξη. Αυτές οι αρχέγονες μαύρες οπές, ενώ έχουν μάζα όσο ένα μεγάλο βουνό, δεν υπερβαίνουν σε μέγεθος τον πυρήνα ενός ατόμου.

Η γλώσσα της ενέργειας



Νευτωνική δυναμική και Βιομηχανική Επανάσταση • **Μεταβιβαζόμενη ενέργεια** • Ένα γινόμενο που δεν μπορούν να το μεγαλώσουν οι μηχανές • Το έργο • Εμπλουτίζοντας τον ορισμό του έργου • Έργο σταθερής δύναμης • Μερικά σπουδαία έργα • **Κινητική ενέργεια** • Το θεώρημα της κινητικής ενέργειας • **Δυναμική ενέργεια** • Μέτρηση της βαρυτικής δυναμικής ενέργεια • Παραπέρα γνωριμία με τη δυναμική ενέργεια • **Η διατήρηση της μηχανικής ενέργειας** • Το άθροισμα κινητικής και δυναμικής ενέργειας • Η μηχανική ενέργεια σ' ένα κλειστό σύστημα • **Η μηχανική ενέργεια ελαττώνεται** • **Αύξηση της μηχανικής ενέργειας** • Ο άνθρωπος • Η μηχανή • **Να θυμηθούμε** • **Να αναρωτηθούμε** • **Να λύσουμε προβλήματα** • **Ντοκουμέντο.**

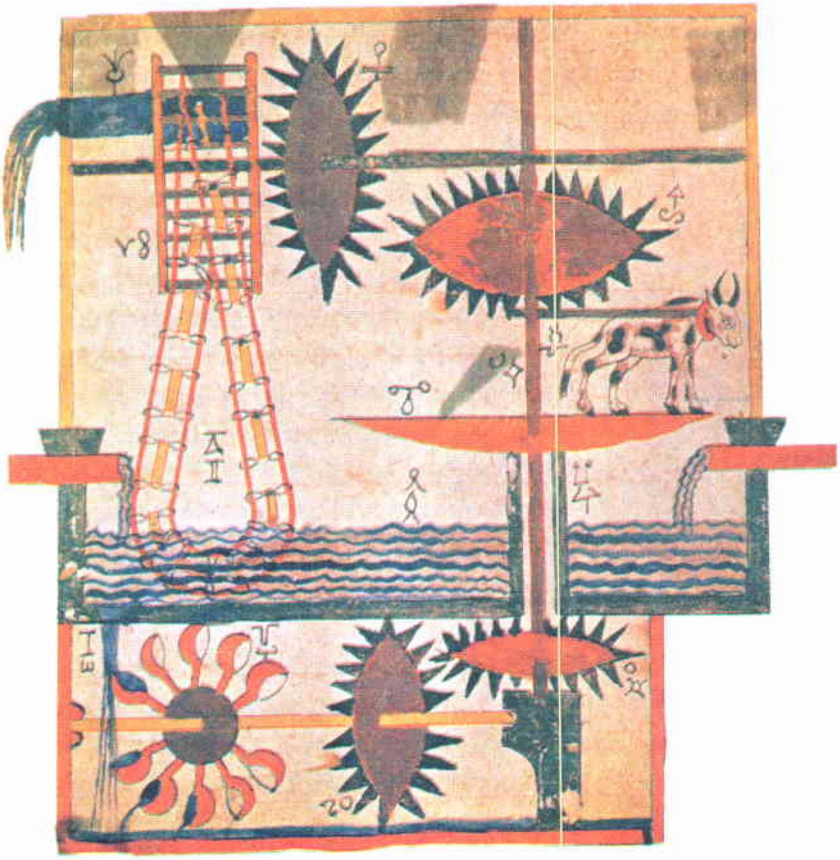
Από τα τέσσερα στοιχεία της ελληνικής αρχαιότητας το Πυρ –η φωτιά– ήταν εκείνο που συμβόλιζε τον πρόσκαιρο και αιώνια μεταβαλλόμενο χαρακτήρα του Σύμπαντος. Ο Ηράκλειτος, ο οποίος ενάμιση περίπου αιώνα πριν από τον Αριστοτέλη το είχε δεχθεί ως θεμελιακό συστατικό του Σύμπαντος, πίστευε ότι η πραγματικότητα ήταν μια συνεχής διεργασία Αλλαγής και Γίγνεσθαι, ένα δυναμικό Σύμπαν σε αιώνια ροή. Υποστήριζε ότι το μοναδικό πράγμα που δεν άλλαζε ήταν η διαρκής αλλαγή και ότι μόνο το Πυρ ήταν στοιχείο βασικό και αιώνιο.

Τον 19ο αιώνα έκανε την εμφάνισή του ένας «κληρονόμος» της αρχαίας ελληνικής φωτιάς, ο οποίος υιοθετήθηκε από τις φυσικές επιστήμες και αποτέλεσε τον πυρήνα μιας εντελώς καινούργιας γλώσσας για την περιγραφή των αλληλεπιδράσεων και της κίνησης. Το όνομά του ήταν **ενέργεια.**

Νευτωνική δυναμική και Βιομηχανική Επανάσταση

Κατά τους δύο αιώνες που ακολούθησαν την εμφάνιση του νευτωνικού έργου, η φυσική, από επιστήμη περιορισμένη να γίνεται αντιληπτή από λίγα εκλεκτά πνεύματα, μετατρέπεται βαθμιαία σε υλική δύναμη ικανή να αλλάξει ριζικά τον τρόπο ζωής ολόκληρης της ανθρωπότητας. Τον 18ο αιώνα η πορεία της σημειώνει μια σχετική κάμψη που συνδέεται με την εδραίωση της νευτωνικής δυναμικής. Το γόητρο του Νεύτωνα έχει διαποτίσει τη σκέψη όλων σχεδόν των ερευνητών. Κάθε τι που θα επεδίωκε να ξεπεράσει τα σύνορα του νευτωνισμού φαινόταν περίπου χωρίς νόημα, ενώ παράλληλα οι άνθρωποι είχαν αρχίσει να πιστεύουν ότι κινούμενοι στο εσωτερικό του νευτωνισμού, θα μπορούσαν να οδηγηθούν σε αλήθειες αιώνιες.

Στο μεταξύ ο 18ος αιώνας σημαδευόταν και από την ιστορικής σημασίας αλλαγή που έχει επικρατήσει να χαρακτηρίζεται ως Βιομηχανική Επανάσταση.



Εικόνα από αραβικό χειρόγραφο του 12ου αιώνα. Παριστάνει μια μηχανή για άντληση νερού.

Είναι η μετάβαση από τη χειρωνακτική εργασία στη μηχανική βιομηχανία, η οποία άλλαξε ολοκληρωτικά το ρόλο που μέχρι τότε έπαιζε ο άνθρωπος στην παραγωγή υλικών και πνευματικών αξιών.

Η καινούργια μέθοδος παραγωγής αποδείχθηκε ένα μεγάλο σχολείο για την επιστημονική γνώση. Από την άλλη, ο άνθρωπος άρχισε να κυριαρχεί πάνω στη φύση και να την εκμεταλλεύεται μ' ένα τρόπο ιστορικά πρωτοφανή, διαμορφώνοντας σιγά σιγά απέναντί της μια στάση βαρβαρότητας.

Μια από τις βασικές συνιστώσες της Βιομηχανικής Επανάστασης ήταν η ανακάλυψη της μηχανής ατμού, η οποία αξιο-

ποιούσε τη «δύναμη» που κρυβόταν μέσα στο κάρβουνο.

Η ατμομηχανή που ανακάλυψαν οι Άγγλοι πρακτικοί μηχανικοί, και κυρίως η βελτίωση της την έβδομη δεκαετία του αιώνα από τον James Watt, έφερε μια πλημμύρα εφευρέσεων που άλλαξαν τη μορφή του ανθρώπινου πολιτισμού.

Μέσα σ' αυτό το πλαίσιο οι επιστήμονες άρχισαν να υποψιάζονται ότι, από πρακτική άποψη, οι νευτωνικοί νόμοι της κίνησης και η έννοια της ορμής δεν ήταν παρά μόνο ένα ξεκίνημα για τη μελέτη των αλληλεπιδράσεων και της κίνησης και όχι η κατάληξη, όπως είχε φανεί στην αρχή. Κι αυτό γιατί η νευτωνική δυναμική δεν μπορούσε να δώσει ικανοποιητική απάντηση σε ερωτήματα που οι πρωτοπόροι της βιομηχανικής επανάστασης αντιμετώπιζαν καθημερινά. Τι χρειάζεται για να γεννηθεί μία δύναμη; Πως θα μπορούσε η νευτωνική δυναμική να εξηγήσει τη δύναμη που κρυβόταν μέσα στα καύσιμα; Πως θα μπορούσε να μελετηθεί επιστημονικά η καλύτερη απόδοση της μηχανής ατμού;



Στην γκραβούρα ο νεαρός James Watt σκεπτικός μπροστά σε μια μηχανική αντλία.

Τα πράγματα οδηγήθηκαν σιγά σιγά στη **δημιουργία μιας καινούργιας επιστημονικής έννοιας**, η οποία, χωρίς να αμφισβητήσει τις βάσεις της νευτωνικής δυναμικής, συνέβαλε στη μετεξέλιξή της. Με την πάροδο του χρόνου η καινούργια έννοια εξελίχθηκε και κατάφερε να ενοποιήσει κάτω από το σκήπτρο της πράγματα που δεν φαινόταν ότι θα μπορούσαν να έχουν κάτι κοινό, όπως η θερμότητα, η κίνηση, ο ηλεκτρισμός, το φως, ο ήχος και η δύναμη που κρύβεται στα καύσιμα. Η καινούρια αυτή έννοια είναι η **ενέργεια.** Στις αρχές του αιώνα μας αποτέλεσε ένα βασικό νοητικό όπλο της επιστημονικής επανάστασης που προκάλεσε η θεωρία των κβάντα και η θεωρία της σχετικότητας. Σήμερα θεωρείται κεντρικός ενωτικός πυρήνας της φυσικής επιστήμης, ενώ ταυτόχρονα τη συνδέει με τις άλλες επιστήμες αλλά και με την ανθρώπινη τεχνολογική δραστηριότητα.

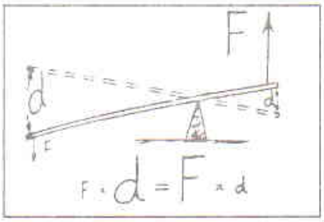


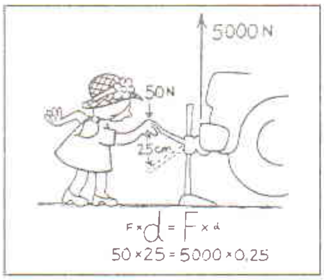
Στην γκραβούρα παριστάνεται σχέδιο ενός οχήματος κινούμενου με ατμομηχανή (1765).

Θα αρχίσουμε να μελετάμε την ενέργεια και τη γλώσσα της, ξεκινώντας από τη σχέση της με τη νευτωνική δυναμική.

Μεταβιβαζόμενη ενέργεια

Ένα γινόμενο που δεν μπορούν να το μεγαλώσουν οι μηχανές



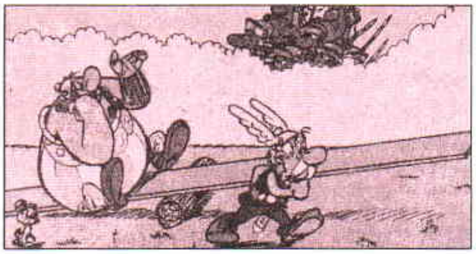


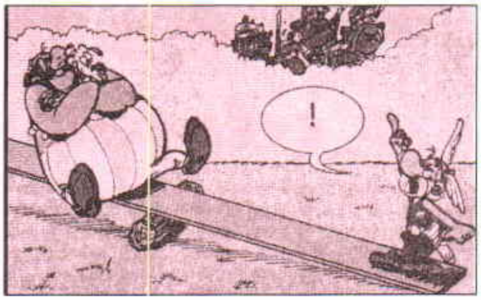
Όποτε θελήσει ο άνθρωπος, να μεγαλώσει κάποια δύναμη, το καταφέρνει με μια ευκολία εντυπωσιακή. Παίρνει ένα μοχλό, τον στηρίζει πάνω στο υπομόχλιο, ασκεί στο ένα άκρο κάποια μυϊκή δύναμη οπότε στο άλλο άκρο εμφανίζεται μια δύναμη που θα μπορούσε, λόγου χάριν, να είναι τριπλάσια.

Όταν μείνει από λάστιχο, στηρίζει καλά τον γρύλο, ασκεί δύναμη 50 N και από την άλλη πλευρά εμφανίζεται δύναμη 5000 N ικανή να σηκώσει το αυτοκίνητο.

Κι ακόμα μπορεί να φρενάρει μπροστά στον κίνδυνο. Καθώς δηλαδή οδηγεί, ασκεί μία σχετικά μικρή δύναμη με το δεξί πόδι στο μεσαίο πεντάλ και συμβαίνει το εκπληκτικό γεγονός, ύστερα από λίγο, να ακινητοποιείται ολόκληρο αυτοκίνητο. Αν σταματήσουμε εδώ, θα φανεί ότι η δύναμη είναι κάτι που μπορούμε να το μεγαλώνουμε χωρίς κανένα τίμημα. Τα πράγματα δεν είναι όμως έτσι. «Αγοράζοντας» δύναμη κάτι πληρώνουμε οπωσδήποτε.

Ας ξαναδούμε τις προηγούμενες δραστηριότητες από την αρχή. Παίρνοντας μέσω του μοχλού δύναμη τριπλάσια από εκείνη που εξασκήσαμε, «πληρώνουμε» σε δρόμο. Για να πετύχουμε, δηλαδή, στο άλλο άκρο ορισμένη μετατόπιση, θα χρειαστεί η μετατόπιση που θα προκαλέσουμε στο σημείο που εμείς ασκούμε τη δύναμη και είναι τουλάχιστον τριπλάσια. Για να αγοράσουμε δηλαδή τριπλάσια δύναμη, πρέπει να πληρώσουμε τριπλάσιο δρόμο. Για να ανυψωθεί το αυτοκίνητο, με τη βοήθεια του γρύλου κατά 0,25 εκατοστά, πρέπει να μετακινήσουμε το σημείο όπου ασκούμε τη δύναμη κατά 25 εκατοστά, 100 δηλαδή φορές περισσότερο.





Κάτι ανάλογο συμβαίνει σ' όλες εκείνες τις διατάξεις που έχουμε επινοήσει για να μας πολλαπλασιάζουν τις δυνάμεις που διαθέτουμε και τις λέμε **απλές μηχανές**. Κερδίζουμε σε δύναμη χάνοντας σε δρόμο και μάλιστα, όσες φορές κερδίζουμε σε δύναμη, τόσες φορές χάνουμε σε δρόμο. Είναι μια πολύ παλιά εμπειρική διαπίστωση. **Ο χρυσός κανόνας της μηχανικής,** έλεγαν οι αρχαίοι.

Αυτό το «χάνουμε-κερδίζουμε» μπορούμε να το περιγράψουμε και διαφορετικά. Σε κάθε μια περίπτωση το γινόμενο *δύναμη x μετατόπιση*, που εμφανίζεται στη μια πλευρά της απλής μηχανής, είναι ίσο με το γινόμενο *δύναμη x μετατόπιση* που εμφανίζεται στην άλλη. Το γινόμενο 50 N x 25 cm στην περίπτωση του γρύλου ήταν ίσο με το γινόμενο 5.000 N x 0,25 cm.

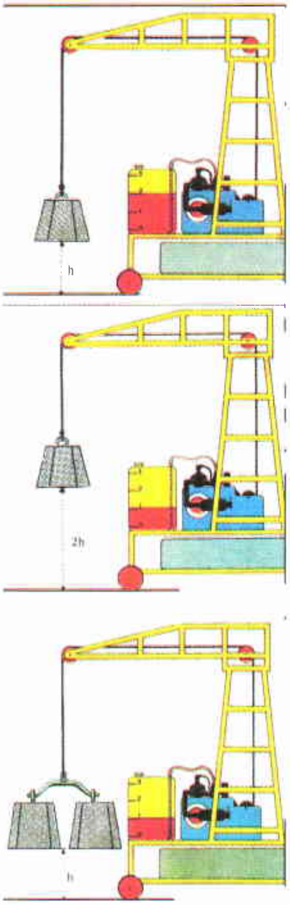
Μπορεί συνεπώς μια μηχανή να μας μεγαλώνει τη δύναμη, αλλά την ποσότητα *δύναμη x μετατόπιση* δεν μπορεί να μας τη μεγαλώσει.

Αν θέλαμε λοιπόν να αποτιμήσουμε την εργασία του ανθρώπου που κινεί τη μηχανή, το λογικό θα ήταν να μην πάρουμε υπόψη μόνο τη δύναμη που εξάσκησε ή μόνο τη μετατόπιση που πραγματοποίησε, αλλά να τον πληρώσουμε με βάση το γινόμενο *δύναμη επί μετατόπιση*. Το γινόμενο αυτό το λέμε **έργο της δύναμης.**

Για το συμβολισμό του έργου, έχει επικρατήσει το γράμμα W, αρχικό της αγγλικής λέξης Work, που σημαίνει εργασία, έργο.

Ως μονάδα μετρήσεως χρησιμοποιείται το **1 Joule,** το έργο δύναμης 1N σε μετατόπιση 1 m. Συμβολίζεται με 1 J.

Το έργο είναι ποσότητα μεταβιβαζόμενης ενέργειας



Βάζουμε τώρα να εργαστεί μια μηχανή. Ένας γερανός, για παράδειγμα, που ανυψώνει βαριά αντικείμενα. Κάθε φορά το σώμα ανυψώνεται αργά με σταθερή ταχύτητα και η δύναμη (F) που ασκεί ο γερανός είναι ίση κατά μέτρο με το βάρος του.

Ας αναζητήσουμε τη σχέση ανάμεσα στη δύναμη, το ύψος και το καύσιμο. Κάνουμε τις διαδοχικές μετρήσεις και καταγράφουμε τα αποτελέσματα σε πίνακα.

Δύναμη	Ύψος	Έργο	Κατανάλωση σε όγκο
F	h	F h	V
2F	h	2 Fh	2V
F	2h	2 Fh	2V
F	3h	3 Fh	3V

Τα συμπεράσματα. Η ποσότητα βενζίνης είναι ανάλογη προς το έργο. Βλέπουμε δηλαδή για το γινόμενο *δύναμη x μετατόπιση* ένα ακόμη γνώρισμα. Ότι μπορεί να μετρηθεί από την ποσότητα καυσίμου που καταναλώθηκε για την πραγματοποίησή του αλλά και να μετρήσει αυτή την ποσότητα.

Μέχρις εδώ **γνωρίσαμε το έργο σαν μια ποσότητα η οποία:**

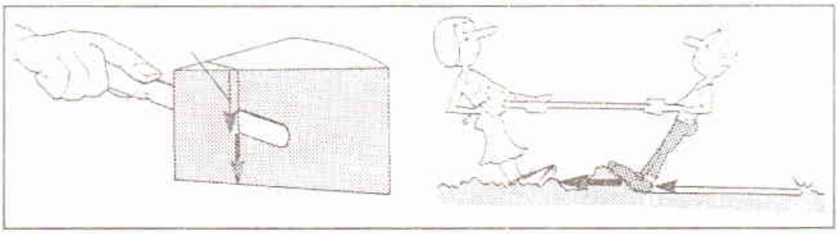
- **είναι αδύνατον να αυξηθεί από μια μηχανή**
- **μπορεί να μετρηθεί από την ποσότητα του καυσίμου που ξοδεύτηκε για την πραγματοποίησή του.**

Για τη φυσική το γινόμενο *δύναμη x μετατόπιση* με τις δύο παραπάνω ιδιότητες μας μετράει την ποσότητα μεταβιβαζόμενης ενέργειας. Με άλλα λόγια *το έργο είναι ποσότητα μεταβιβαζόμενης ενέργειας*. Καθώς ασκούμε στον γρύλο δύναμη 50 N και η μετατόπιση είναι 0,25m το γινόμενο 50 N x 0,25 m=1,25 τζάουλ είναι η μεταβιβαζόμενη στον γρύλο ενέργεια. Η ενέργεια που μεταβιβάζει ο γρύλος στο αυτοκίνη-

το δεν μπορεί να είναι μεγαλύτερη από 1,25 τζάουλ.

Εμπλουτίζοντας τον ορισμό του έργου

Σε όλα τα μέχρι τώρα παραδείγματα η ασκούμενη στο σώμα δύναμη είχε την ίδια κατεύθυνση με τη μετατόπισή του οπότε είχαμε μεταβίβαση ενέργειας προς το σώμα. Το έργο της δύναμης σ' αυτές τις περιπτώσεις θεωρείται εξ ορισμού θετικό.



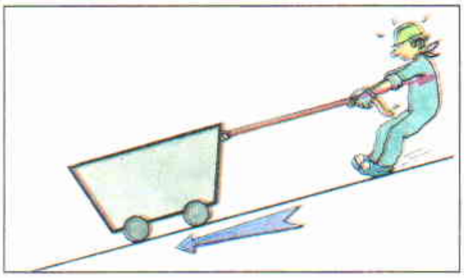
Μηδενικό έργο

Οδηγούμε ένα μηχανάκι με σταθερή ταχύτητα και καταναλώνουμε βέβαια βενζίνη, γιατί ομαλή κίνηση σημαίνει ότι με τη βοήθεια της μηχανής υπερνικώνται οι αντιστάσεις και οι τριβές. Αν θελήσουμε να αυξήσουμε την ταχύτητα προσδίδοντας στο δίτροχο επιτάχυνση, θα έχουμε, εννοείται μεγαλύτερη κατανάλωση. Αν όμως θελήσουμε να πάρουμε στροφή με ταχύτητα ίδιου μέτρου, παρόλο που εμφανίζεται κεντρομόλος επιτάχυνση –που θα μπορούσε μάλιστα η τιμή της να ξεπερνάει την επιτάχυνση μιας απότομης εκκίνησης– διαπιστώνουμε ότι η κατανάλωση βενζίνης δεν πρόκειται να αυξηθεί. Η κεντρομόλος δύναμη, λοιπόν, που ασκείται στο μηχανάκι δεν αυξάνει την κατανάλωση. Αν θυμηθούμε τώρα αυτό που είπαμε προηγουμένως, ότι δηλαδή το έργο μετριέται με τη βενζίνη που καταναλώνεται για να πραγματοποιηθεί, θα πρέπει να δεχθούμε ότι η κεντρομόλος δύναμη δεν εκτελεί έργο.

Για να «στρίψει» λοιπόν ένα κινούμενο αντικείμενο χρειάζεται οπωσδήποτε να ασκηθεί δύναμη αλλά δεν χρειάζε-

ται μεταβίβαση ενέργειας. Αν θεωρήσουμε ότι η κίνηση ενός τεχνητού δορυφόρου είναι ομαλή κυκλική το γεγονός ότι στο κινούμενο αυτό αντικείμενο ασκείται δύναμη βαρύτητας δεν σημαίνει ότι του μεταβιβάζεται ενέργεια.

Πρέπει συνεπώς να αποδεχθούμε ότι αν η ασκούμενη σ' ένα αντικείμενο δύναμη είναι κάθετη στην ταχύτητά του το έργο της είναι μηδενικό. Λέμε τότε ότι στο αντικείμενο δεν μεταβιβάζεται ενέργεια.



Έργο αρνητικό

Ο εργάτης στην εικόνα προσπαθεί να συγκρατήσει το καρότσι, καθώς εκείνο τον παρασύρει.

Το καρότσι μεταβιβάζει στον εργάτη ενέργεια.

Αν θεωρήσουμε ως *σώμα* το καρότσι μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι:

ι) Η δύναμη που ασκείται σ' αυτό από το τεντωμένο σκοινί έχει κατεύθυνση αντίθετη από τη μετατόπισή του.

ιι) Η επίδραση της δύναμης αυτής συνδέεται με το γεγονός ότι το καρότσι μεταβιβάζει ενέργεια. Αν κόβαμε, δηλαδή το σκοινί, αυτό δεν θα συνέβαινε.

Σ' αυτές τις περιπτώσεις θεωρούμε ότι το έργο της δύναμης είναι αρνητικό.

Έργο σταθερής δύναμης

Συνδυάζοντας όλα όσα αναφέρθηκαν, μπορούμε τώρα να δώσουμε για το έργο κάποιο ορισμό. Προς το παρόν θα χρειαστεί να θεωρήσουμε ότι η δύναμη που εκτελεί το έργο είναι σταθερή και ότι η κίνηση πραγματοποιείται σε ευθύγραμμη τροχιά.

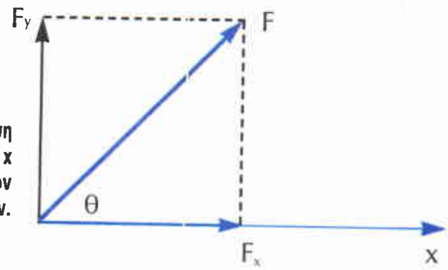
Παρακολουθούμε ένα ευθύγραμμα κινούμενο αντικείμενο στο οποίο ασκούνται διάφορες δυνάμεις. Συγκεντρώνουμε την προσοχή μας σε μια απ' αυτές (F) –η οποία κατά τη διάρκεια κάποιας μετατόπισης (x) παραμένει σταθερή– και ενδιαφερόμαστε για το έργο της.

Την αναλύουμε σε δύο συνιστώσες από τις οποίες η μία F_y να είναι κάθετη στη μετατόπιση και η άλλη F_x να αποτελεί την προβολή της F πάνω στη διεύθυνση της μετατόπισης. Εφόσον το έργο της F_y θα είναι μηδέν, έργο της F θα είναι το έργο της F_x. Μπορούμε να γράφουμε:

$W_F = W_{Fx} + W_{Fy}$ και εφόσον $W_{Fy} = 0$ θα είναι $W_F = W_{Fx} = F_x x$. Εάν είναι θ η γωνία των διανυσμάτων $\vec{F}$ και $\vec{x}$ θα είναι

$F_x = F\sigma\upsilon\nu\theta$ οπότε $W_F = Fx\ \sigma\upsilon\nu\theta$.

$W = Fx\ \sigma\upsilon\nu\theta$



Έργο σταθερής δύναμης σε κίνηση ευθύγραμμη. Τα σύμβολα F και x παριστάνουν τα μέτρα των αντίστοιχων διανυσμάτων.

Μερικά «σπουδαία» έργα

Το έργο της δύναμης βάρος, το έργο της τριβής και το έργο της δύναμης του ελατηρίου είναι έργα με τα οποία αξίζει τον κόπο να ασχοληθούμε κάπως ειδικότερα.

Το βάρος και οι τριβές είναι οι πιο «καθημερινές» μας δυνάμεις. Γεννιόμαστε, αναπτυσσόμαστε και εργαζόμαστε μέσα στις τριβές και τη βαρύτητα. Το ελατήριο είναι, όπως έχουμε πει αλλού, βασικό εξάρτημα μηχανισμών που συναντάμε από το αυτοκίνητο μέχρι τον κοινό διακόπτη του ηλεκτρικού. Κι ακόμα είναι από τα συνηθισμένα *μοντέλα* που χρησιμοποιεί η φυσική, για να περιγράψει φαινόμενα που εκτείνονται από την κίνηση μέχρι τα κυκλώματα της τηλεόρασης, τη θερμική ακτινοβολία ενός φούρνου και την απορρόφηση του φωτός.

Πέρα, όμως, από όλα αυτά, το έργο του βάρους, θα χρησιμοποιηθεί για τη συγκρότηση μιας σχετικά δύσκολης έννοιας, που πρόκειται να μελετήσουμε πιο κάτω και τη λένε *δυναμική ενέργεια*. Αντίθετα το έργο των τριβών έχει ένα άλλου είδους, ενδιαφέρον, γιατί σχετίζεται με τη φαινομενική εξαφάνιση της ενέργειας.

Το έργο του βάρους. Θα υπολογίσουμε πρώτα το έργο του βάρους για μετατοπίσεις μικρής έκτασης, έτσι ώστε η βαρυτική επιτάχυνση (g) να είναι σταθερή.

Σύμφωνα με τον ορισμό του έργου:

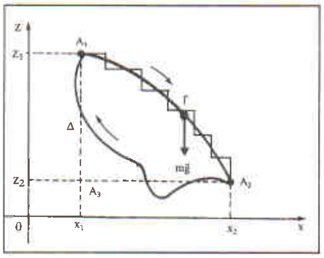
α) Κατά την κατακόρυφη κίνηση ενός αντικειμένου προς τα κάτω το έργο της δύναμης *βάρος* (mg) για μετατόπιση h είναι

$W = mgh$

β) Κατά την κατακόρυφη κίνηση προς τα πάνω το έργο του βάρους είναι αρνητικό και ίσο με

$W = -mgh$

γ) Για οποιοδήποτε οριζόντια μετατόπιση το έργο του βάρους είναι μηδέν.



Μια τυχαία τέλος μετακίνηση ενός (σημειακού) αντικειμένου μπορεί να θεωρηθεί ότι πραγματοποιείται με στοιχειώδεις οριζόντιες και κατακόρυφες μετατοπίσεις όποτε το έργο του βάρους υπολογίζεται ως άθροισμα των αντίστοιχων στοιχειωδών έργων. Εφόσον τα έργα σε όλες τις οριζόντιες μετατοπίσεις θα είναι μηδενικά, μπορούμε να αποδείξουμε ότι

$$\mathbf{W = mg(h_1 - h_2)}$$

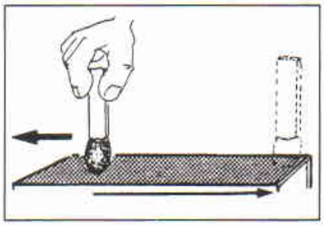
όπου h_1 το αρχικό και h_2 το τελικό ύψος (από κάποια οριζόντια επιφάνεια) στο οποίο βρέθηκε το αντικείμενο.

Καθώς λοιπόν το αντικείμενο μετακινείται από μια θέση σε άλλη το έργο του βάρους είναι ανεξάρτητο από το είδος της διαδρομής. Η τιμή του εξαρτάται από το βάρος και από την υψομετρική διαφορά των δύο θέσεων και είναι θετική όταν το αντικείμενο *χάνει ύψος* και αρνητική όταν το αντικείμενο *κερδίζει ύψος*.

Είναι φανερό ότι, όταν η διαδρομή διανυθεί αντίστροφα, το έργο του βάρους αλλάζει πρόσημο, δηλαδή
$W(2,1) = -W(1,2)$. Επομένως το έργο του βάρους για κλειστή διαδρομή, όπως αυτή του σχήματος, είναι μηδέν:

Δυνάμεις όπως το βάρος, των οποίων το έργο σε κλειστή διαδρομή είναι μηδέν, χαρακτηρίζονται *διατηρητικές*.

Το έργο της τριβής ολίσθησης. Για ευκολία ας θεωρήσουμε



την κίνηση ενός αντικειμένου σε ευθύγραμμη τροχιά. Το έργο της τριβής ολίσθησης για μετατόπιση x δίνεται από τη σχέση:

$W_T = T \times$ συν180° οπότε $W_T = -Tx$. Το έργο αυτό είναι πάντα αρνητικό. Σε μια κλειστή διαδρομή, λοιπόν, είναι αδύνατον να έχουμε έργο τριβής μηδέν.

Η τριβή ολίσθησης δεν ανήκει στην κατηγορία των δυνάμεων που λέγονται διατηρητικές. Είναι μια δύναμη *μη διατηρητική*.

Το έργο της δύναμης ελατηρίου. Για να επιμηκύνουμε ένα ελατήριο πρέπει να ασκήσουμε στα άκρα του δύο αντίθετες δυνάμεις. Αν το ένα του άκρο είναι ακινητοποιημένο από ένα στήριγμα τη μια από αυτές τις δυνάμεις την ασκεί το στήριγμα. Για την άλλη μπορούμε να γράψουμε την εξίσωση η οποία εκφράζει το νόμο του Hooke.

Θέλουμε να υπολογίσουμε το έργο που εκτελεί η δύναμη αυτή ασκούμενη στο άκρο Α του ελατηρίου σταθεράς k. Δεν μπορούμε να καταφύγουμε στο γινόμενο *δύναμη επί μετατόπιση* γιατί κατά τη διάρκεια της επιμήκυνσης (x) η δύναμη δεν παραμένει σταθερή. Αν εφαρμόσουμε μια συγκεκριμένη τεχνική μπορούμε να αποδείξουμε ότι το έργο (W) είναι ίσο με:

$$\mathbf{W = \frac{1}{2}\, k\, x^2}$$

Η εξίσωση αυτή μας δίνει το έργο της δύναμης, η οποία ασκείται στο άκρο του ελατηρίου καθώς αυτό επιμηκύνεται από το φυσικό του μήκος ℓ_0 σε μήκος ℓ, οπότε $x=\ell-\ell_0$.

Εξυπακούεται ότι το έργο της δύναμης την οποία *ασκεί* το ελατήριο στο σώμα που βρίσκεται στο άκρο του είναι απολύτως ίσο με το προηγούμενο αλλά αρνητικό. Παρόμοιες εξισώσεις ισχύουν και κατά τη συμπίεση του ελατηρίου.

Κινητική ενέργεια

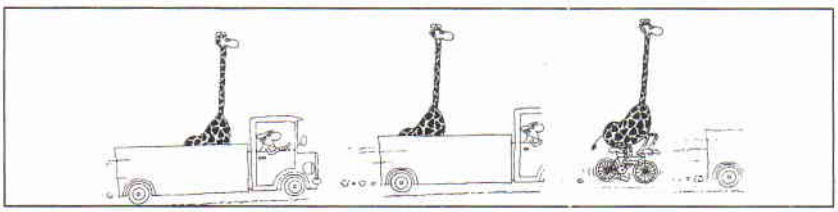
Ας φανταστούμε ένα σημειακό αντικείμενο μάζας m αρχικά ακίνητο ως προς κάποιο σύστημα αναφοράς. Ας υποθέσουμε ότι σε κάποια χρονική στιγμή, που τη θεωρούμε αρχή των χρόνων, ασκείται στο αντικείμενο δύναμη (συνισταμένη) η οποία στη συνέχεια παραμένει σταθερή.

Αν βασιστούμε στους νευτωνικούς νόμους, μπορούμε να προβλέψουμε τι θα έχει συμβεί, ύστερα από την πάροδο χρόνου t κατά τον οποίο το αντικείμενο θα έχει μετατοπιστεί κατά x. Σύμφωνα με τον δεύτερο νευτωνικό νόμο η κίνηση θα είναι ευθύγραμμη ομαλά επιταχυνόμενη και θα ισχύει: $\mathbf{F = m\alpha}$ **(1)**
Στο τέλος της διάρκειας t η ταχύτητα του αντικειμένου θα είναι: $\mathbf{\upsilon = \alpha t}$ **(2)** και η μετατόπιση του θα δίνεται από τη σχέση: $\mathbf{x = \frac{1}{2} \alpha t^2}$ **(3)**
Μετατόπιση, όμως, μαζί με δύναμη (ίδιας κατεύθυνσης) σημαίνει ότι στο αντικείμενο μεταβιβάζεται ενέργεια $\mathbf{W = Fx}$ **(4)**

Από τις τέσσερις εξισώσεις συνάγεται ότι $\mathbf{W = m\upsilon^2/2}$

Η ενέργεια δηλαδή που μεταβιβάστηκε στο αρχικά ακίνητο αντικείμενο (και είχε σαν συνέπεια να αποκτήσει ορισμένη ταχύτητα υ) είναι ίση με $\mathbf{\frac{1}{2} m\upsilon^2}$

Ας ενδιαφερθούμε γι' αυτή την ποσότητα. Αναφέρεται στο κινούμενο αντικείμενο. Όπως και η ορμή –το γνωστό διανυσματικό μέγεθος που περιγράφει την κινητική κατάσταση– συγκροτείται κι αυτή από τα ίδια μεγέθη, τη μάζα και την ταχύτητα. Αλλά η ομοιότητα σταματάει εδώ. Η ορμή είναι διάνυσμα που προκύπτει από το γινόμενο της μάζας επί την ταχύτητα, ενώ η καινούρια ποσότητα είναι μονόμετρο μέγεθος ίσο με το ένα δεύτερο της μάζας του σώματος επί το τετράγωνο της στιγμιαίας ταχύτητάς του ως προς κάποιο σύστημα αναφοράς.

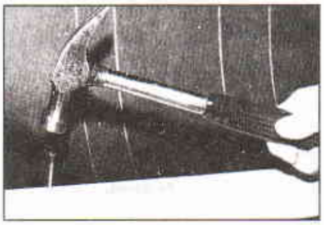


Η κινητική ενέργεια ενός σώματος έχει νόημα σε σχέση μ' ορισμένο πάντα σύστημα αναφοράς

Η καινούργια αυτή ποσότητα λέγεται *κινητική ενέργεια*. Στη γλώσσα της ενέργειας λέμε ότι κάθε κινούμενο αντικείμενο σε κάθε χρονική στιγμή *έχει* ορισμένη κινητική ενέργεια.

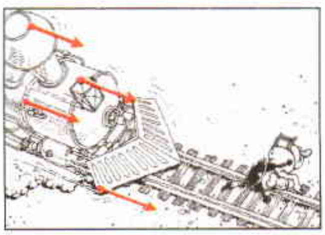
$$\mathbf{K = \frac{1}{2} m\upsilon^2}$$ Κινητική ενέργεια σημειακού αντικειμένου

Η φυσική σημασία της έννοιας σχετίζεται οπωσδήποτε και με την ανθρώπινη εμπειρία. Και η εμπειρία μάς διδάσκει ότι κάθε κινούμενο αντικείμενο «κρύβει» μία δυνατότητα. Το σφυρί, για παράδειγμα. Καθώς καρφώνουμε, λίγο προτού συναντήσει την πρόκα, έχει κινητική ενέργεια. Την έχει, επειδή για να την αποκτήσει εκτελέσαμε έργο. Την έχει επειδή έχει τη δυνατότητα χτυπώντας την πρόκα να ασκήσει δύναμη και να εκτελέσει έργο.



Κάθε κινούμενο αντικείμενο, εξαιτίας και μόνο του γεγονότος, ότι κινείται, έχει την *ικανότητα* να μεταδώσει κίνηση και να εκτελέσει έργο. Η ικανότητα ακριβώς αυτή μας κάνει να λέμε ότι έχει κινητική ενέργεια. Μπορούμε να τη μετρήσουμε τόσο αν συνδεθούμε με το *παρελθόν* του αντικειμένου –με το έργο δηλαδή που εκτελέστηκε για να αποκτηθεί η κίνηση– όσο και με την ποσότητα ενέργειας που μπορεί να μεταβιβάσει μέχρι να ακινητοποιηθεί.

Μέχρι τώρα ασχολούμαστε με ένα μόνο σημειακό αντικείμενο. Όταν έχουμε ένα σύνολο τέτοιων αντικειμένων με μάζες, m_1, m_2, m_3,...m_ν και ταχύτητες υ_1, υ_2, υ_3 ... υ_ν (ως προς ορισμένο σύστημα αναφοράς) ως κινητική ενέργεια του συστήματος θεωρούμε το άθροισμα των κινητικών τους ενεργειών. Να προσέξουμε ότι η κινητική ενέργεια ενός συστήματος δεν μπορεί να είναι αρνητική. Μόνο αν όλα τα αντικείμενα ήταν ακίνητα, θα μπορούσε να είναι μηδέν.



Ας δούμε τώρα πως θα μπορέσουμε να υπολογίσουμε την κινητική ενέργεια ενός σώματος με διαστάσεις. Μια λύση, είναι να θεωρήσουμε το κινούμενο σώμα σαν ένα πεπερασμένο σύνολο από αντικείμενα με μάζες, m_1, m_2, ... m_ν και ταχύτητες υ_1, υ_2, υ_3 ... υ_ν. Σύμφωνα με τα προηγούμενα, αν το αντικείμενο εκτε-

λεί μεταφορική κίνηση –πράγμα που σημαίνει ότι όλα τα σημειακά αυτά αντικείμενα έχουν κοινή ταχύτητα υ –η κινητική του ενέργεια υπολογίζεται εύκολα. Είναι ίση με $\frac{1}{2} m\upsilon^2$ όπου m η μάζα του σώματος.

Εξυπακούεται ότι κινητική ενέργεια έχει και ένα περιστρεφόμενο στερεό αλλά η τιμή της δεν υπολογίζεται από την εξίσωση αυτή. Πάντως, όσο πιο γρήγορα στρέφεται ένας τροχός τόσο μεγαλύτερη θα είναι η κινητική του ενέργεια.

Στη γενική, τέλος, περίπτωση που το σώμα εκτελεί μια τυχαία κίνηση, η οποία είναι δυνατόν να αναλυθεί σε μεταφορική και περιστροφική, η κινητική του ενέργεια υπολογίζεται ως άθροισμα των κινητικών ενεργειών λόγω μεταφοράς και λόγω περιστροφής.



Οι άνθρωποι από πολύ παλιά ήξεραν ότι ένα σώμα μπορεί να κάνει τόσο μεγαλύτερη «ζημιά» όσο πιο βαρύ είναι και όσο πιο μεγάλη είναι η ταχύτητά του. Στον πίνακα διακρίνεται ο «κριός» όπως τον χρησιμοποιούσαν τον Μεσαίωνα, σαν πολεμική μηχανή για την άλωση του κάστρου.

Έργο «συνεργασίας» δυνάμεων. Το θεώρημα της κινητικής ενέργειας

1. Όταν σε κινούμενο σώμα ασκούνται παραπάνω από μία δυνάμεις, κάθε μια απ' αυτές εκτελεί το έργο της ανεξάρτητα από τις άλλες. Το αλγεβρικό άθροισμα όλων των έργων λέγεται **ολικό έργο** – $W_{ολ}$ – και αποδεικνύεται ότι είναι ίσο με το έργο της συνισταμένης των δυνάμεων. Για να υπολογίσουμε το ολικό έργο μπορούμε λοιπόν (α) να υπολογίσουμε το έργο κάθε μιας δύναμης χωριστά και να προσθέσουμε όλα τα έργα είτε (β) να προσδιορίσουμε τη συνισταμένη και στη συνέχεια να υπολογίσουμε το έργο της. Κάνουμε κατά περίπτωση ό,τι μας βολεύει περισσότερο.

2. Βασιζόμενοι στον θεμελιώδη νόμο της δυναμικής μπορούμε να αποδείξουμε ότι σε κάθε μετατόπιση το ολικό έργο των δυνάμεων που ασκήθηκαν σε ένα σώμα είναι ίσο με τη μεταβολή που παρουσίασε η κινητική ενέργεια του σώματος.

$$\mathbf{K_2 - K_1 = W_{ολ}}$$

Η πρόταση αποτελεί το λεγόμενο **θεώρημα της κινητικής ενέργειας.**

Χαρακτηρίζεται θεώρημα γιατί δεν αποτελεί κάποιον ξεχωριστό νόμο της φυσικής αλλά απορρέει από τον θεμελιώδη νόμο της δυναμικής. Ισχύει για δυνάμεις οποιεσδήποτε και συνιστά ένα εύχρηστο εργαλείο για τη λύση προβλημάτων κίνησης.

Η απόδειξη

Θεωρούμε ένα αντικείμενο μάζας m. Ας υποθέσουμε ότι σε κάποια χρονική στιγμή, που τη θεωρούμε αρχή των χρόνων, η ταχύτητά του είναι $\vec{\upsilon}_0$ και ότι από τη στιγμή εκείνη η ασκούμενη σ' αυτό (συνισταμένη) δύναμη $\vec{F}$ έχει την κατεύθυνση της ταχύτητας $\vec{\upsilon}_0$ και παραμένει σταθερή.

Σύμφωνα με τον δεύτερο νόμο, το κινητό παρουσιάζει σταθερή επιτάχυνση, με την κατεύθυνση της δύναμης και της ταχύτητας $\vec{\upsilon}_0$ και τέτοια ώστε να ισχύει $\vec{F} = m\vec{\alpha}$.

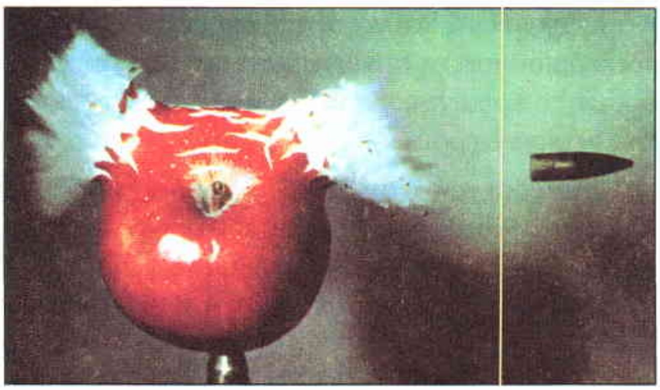
Στο τέλος της διάρκειας t θα έχει παρουσιάσει ταχύτητα

$\upsilon = \upsilon_0 + \alpha t$ και μετατόπιση $x = \upsilon_0 t + ½ \alpha t^2$. Μετατόπιση, όμως, μαζί με δύναμη (ίδιας κατεύθυνσης) σημαίνει έργο. Ας επιχειρήσουμε να συσχετίσουμε το έργο αυτό (W) με τη μεταβολή, η οποία εμφανίστηκε στην κινητική κατάσταση του σώματος. Συνδυάζουμε τις τέσσερις εξισώσεις

$W = Fx \qquad F = m\alpha \qquad x = \upsilon_0 t + ½ \alpha t^2 \qquad \upsilon = \upsilon_0 + \alpha t$

οπότε

$$W = \frac{1}{2}m\upsilon^2 - \frac{1}{2}m\upsilon_0^2$$



Καθώς το βλήμα διαπερνά το μήλο, η κινητική του ενέργεια μειώνεται. Η μείωση αυτή είναι ίση με το έργο των δυνάμεων που την προκάλεσαν.



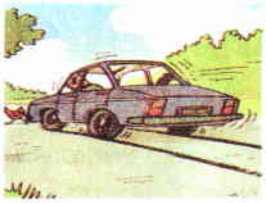
• Η (συνισταμένη) δύναμη έχει την κατεύθυνση της ταχύτητας και της μετατόπισης.

• Η επιτάχυνση προκαλεί αύξηση στην τιμή της ταχύτητας.

• Η παρουσία της δύναμης προκαλεί αύξηση της κινητικής ενέργειας του σώματος.

• Το έργο της δύναμης είναι θετικό.

• Το περιβάλλον μεταβιβάζει στο σώμα ενέργεια.



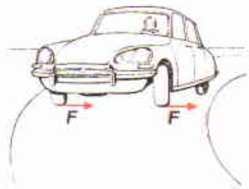
• Η (συνισταμένη) δύναμη έχει αντίθετη κατεύθυνση σε σχέση με την ταχύτητα και τη μετατατόπιση.

• Η επιτάχυνση προκαλεί μείωση στην τιμή της ταχύτητας.

• Η δύναμη συμβάλλει στη μείωση της κινητικής ενέργειας του σώματος.

• Το έργο της δύναμης είναι αρνητικό.

• Το σώμα μεταβιβάζει στο περιβάλλον ένα μέρος από την κινητική του ενέργεια.



• Η (συνισταμένη) δύναμη είναι κάθετη στην ταχύτητα.

• Η επιτάχυνση είναι κεντρομόλος και δεν προκαλεί καμία μεταβολή στο μέτρο της ταχύτητας.

• Η δύναμη δεν επηρεάζει την κινητική ενέργεια του σώματος.

• Το έργο της δύναμης είναι μηδέν.

• Το σώμα δεν ανταλλάσσει ενέργεια με το περιβάλλον.

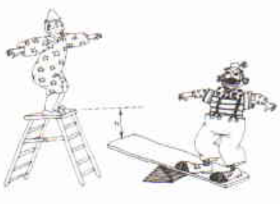
Δυναμική ενέργεια

Τελικά είναι εύκολο να κρίνουμε πότε ένα αντικείμενο έχει κινητική ενέργεια, αρκεί να το αντιλαμβανόμαστε να κινείται. Η ενέργεια, όμως, είναι κάτι συνθετότερο. Αν θέλουμε να διαμορφώσουμε μια προσωπική άποψη γι' αυτή τη μυστηριώδη οντότητα, που εμφανίζεται σε μια ποικιλία μεταμφιέσεων και που δεν μπορεί –όπως επιμένουν οι φυσικοί– ούτε να δημιουργηθεί ούτε να καταστραφεί, θα χρειαστεί μετά την κινητική μορφή της να στραφούμε και να ερευνήσουμε το δεύτερο βασικό της πρόσωπο που λέγεται ενέργεια δυναμική.

Τα γεγονότα • Το φράγμα συγκρατεί το νερό της λίμνης ψηλότερα από τον υδροηλεκτρικό σταθμό. Το νερό είναι ακίνητο. Ξέρουμε όμως ότι μπορεί να τρέξει μέσα σε σωλήνες, να περιστρέψει τους υδροστρόβιλους του σταθμού και να μεταβιβάσει ενέργεια.



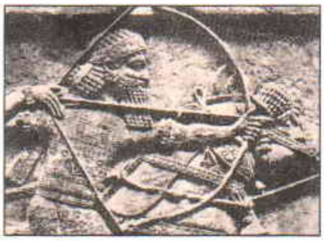
• Στο εργαστήριο. Οι πέντε όμοιες μπίλιες κρέμονται από τα νήματα, ακουμπάνε μεταξύ τους και ακινητούν. Παρεμβαίνει ο μαθητής που αποθανατίζεται στη φωτογραφία. Σηκώνει τη μία απ' αυτές λίγο ψηλότερα, διατηρώντας τεντωμένα τα νήματα. Τη στιγμή εκείνη η μπίλια δεν έχει ταχύτητα. Όλοι όμως ξέρουμε ότι πρόκειται να αποκτήσει ταχύτητα. Έχει λοιπόν τη δυνατότητα, ύστερα από λίγο να μεταδώσει κίνηση, να εκτελέσει έργο. Η μπίλια αρχίζει να κινείται. Σε λίγο χτυπάει την μπίλια που συναντά και ακινητοποιείται. Παρατηρούμε ότι αρχίζει να κινείται η πρώτη μπίλια που βρίσκεται στο άλλο άκρο, το απέναντι. Η κίνηση μεταδόθηκε.



• Στο τσίρκο, δυο κλόουν κάνουν το νούμερό τους. Ο ένας στέκεται στη μια άκρη της τραμπάλας και περιμένει. Ο άλλος σκαρφαλωμένος πάνω σε μια σκάλα βρίσκεται ψηλότερα. Όπως η πέμπτη μπίλια και το νερό του υδροηλεκτρικού φράγματος, έχει κι αυτός τη δυνατότητα να εκτελέσει έργο και να μεταβιβάσει ενέργεια. Μόλις

αφεθεί και πέσει πάνω στη σανίδα, ο άλλος θα τιναχτεί ψηλά.

• Όταν ο βασιλιάς Ασσουρμπανιπάλ ξεκινούσε για κυνήγι, ήξερε αρκετά πράγματα για το τόξο του. Ήξερε ότι τεντώνοντάς το, μολονότι εκείνη τη στιγμή ήταν ακίνητο, είχε αποθηκεύσει δυνατότητα να εκτελέσει έργο και να μεταβιβάσει ενέργεια. Τέτοιου είδους δυνατότητα βρίσκεται αποθηκευμένη και στη σφεντόνα τη στιγμή που έχουμε τεντώσει το λάστιχο. Βρίσκεται και σε κάθε συμπιεσμένο ή τεντωμένο ελατήριο· στο ελατήριο του ρολογιού μας, όταν το κουρδίζουμε, στις σούστες της γυμναστικής, στις παλιές ποντικοπαγίδες με το τυρί, αλλά και στο ψαροντούφεκο.



Ο βασιλιάς Ασσουρμπανιπάλ στο κυνήγι λιονταριών. Ανάγλυφο που βρίσκεται στο Μουσείο του Λούβρου.

Η θεωρητική σκέψη. Ας αναζητήσουμε το κοινό στοιχείο. Το νερό του φράγματος, η πέμπτη μπίλια και ο σκαρφαλωμένος κλόουν είναι αντικείμενα, τα οποία, παρόλο που είναι ακίνητα, έχουν αποθηκευμένη μια δυνατότητα σαν αυτή που αναγνωρίσαμε και στα κινούμενα (και την αποδώσαμε ως ενέργεια), να εκτελέσουν δηλαδή έργο και να μεταβιβάσουν ενέργεια. Πρέπει λοιπόν να συμφωνήσουμε ότι και αυτά κατέχουν κάποια ενέργεια. Την ενέργεια αυτή τη λέμε **ενέργεια δυναμική.** Σχετίζεται με το γεγονός ότι καθένα από τα σώματα.

• βρίσκεται σε ορισμένο ύψος από το έδαφος.

• έχει βάρος ή, μ' άλλα λόγια, ανάμεσα σ' αυτό και στη Γη υφίσταται βαρυτική αλληλεπίδραση.

Μια τέτοιου είδους αποθήκευση δεν θα είχε νόημα, αν δεν υπήρχε βαρύτητα. Γι' αυτό και η δυναμική ενέργεια σ' αυτές τις περιπτώσεις λέγεται **βαρυτική.**

Με το τόξο του βασιλιά, με το λάστιχο της σφεντόνας και με τα ελατήρια συμβαίνει κάτι ανάλογο. Εδώ, βέβαια, το κοινό στοιχείο δεν είναι το ύψος και η βαρύτητα. Τα σώματα αυτά κατέχουν μια ανάλογη δυνατότητα αλλά αυτή οφείλεται στην εκδήλωση της ελαστικότητάς τους. Τη δυναμική ενέργεια σ' αυτές τις περιπτώσεις τη λέμε **ελαστική.**

Το ερώτημα που περιμένει απάντηση είναι: Πώς μπορούμε να μετρήσουμε τη δυναμική ενέργεια;

Μέτρηση της βαρυτικής δυναμικής ενέργειας

Ένα αντικείμενο βάρους mg βρίσκεται σε ύψος h από το έδαφος. Για να μετρήσουμε την τιμή της δυναμικής ενέργειας μπορούμε να κάνουμε αυτό που κάναμε και για την κινητική ενέργεια. Να υπολογίσουμε δηλαδή το έργο που εκτελέστηκε ώστε να βρεθεί το αντικείμενο (από το έδαφος) στη θέση που βρίσκεται τώρα. Το έργο αυτό θα είναι έργο της δύναμης που ασκήθηκε στο αντικείμενο κατά την ανύψωση ώστε να εξουδετερώνει το βάρος του. Θα είναι συνεπώς:

$$\mathbf{U = mgh}$$



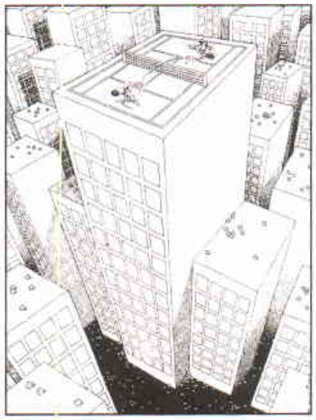
Η θεώρηση αυτή μας βοηθά να κατανοήσουμε και την αποθήκευση ενέργειας, καθώς μας φέρνει στο μυαλό τον ανθρώπινο κόπο που χρειάζεται για να ανυψωθεί το αντικείμενο. Το παράδειγμα ενός αθλητή της άρσης βαρών είναι ενδεικτικό.

Παραπέρα γνωριμία με τη δυναμική ενέργεια

1. Η βαρυτική δυναμική ενέργεια υπάρχει ακριβώς επειδή ανάμεσα στο σώμα και τη Γη υπάρχει βαρυτική αλληλεπίδραση. Ουσιαστικά περιγράφει τη μεταξύ τους αλληλεπίδραση. Κάνει δηλαδή ότι κάνουν και οι δυνάμεις του Νεύτωνα αλλά σε γλώσσα διαφορετική. Είναι μια ενέργεια που αφορά σε ολόκληρο το σύστημα *σώμα-Γη*. Επειδή όμως οι μετακινήσεις του «μικρού» σώματος δεν επηρεάζουν την κίνηση της Γης, μπορούμε (ι) να θεωρούμε σύστημα αναφοράς συνδεδεμένο στέρεα με τη Γη, (ιι) να λέμε ότι το σώμα βρίσκεται στο βαρυτικό πεδίο της Γης και (ιιι) να αναφερόμαστε σε βαρυτική δυναμική ενέργεια του σώματος (U_β). Η τιμή της θα είναι U_β = mgh, όπου το h θα συμβολίζει την απόσταση του σώματος από κά-

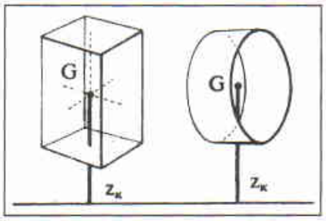
ποια οριζόντια επιφάνεια στην οποία έχουμε συμφωνήσει να αναφερόμαστε. Μπορούμε να λέμε βαρυτική δυναμική ενέργεια ως προς την επιφάνεια ενός τραπεζιού, μιας ταράτσας ή και –όπως κάνουμε συνηθέστερα– ως προς το έδαφος.

Εξυπακούεται ότι η επιφάνεια στην οποία θα αναφερόμαστε πρέπει να είναι οπωσδήποτε οριζόντια.



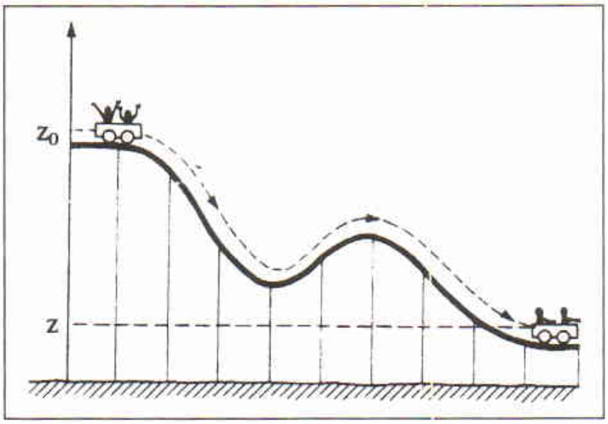
Καθώς διεξάγεται η παρτίδα τένις η δυναμική ενέργεια της μπάλας αυξομειώνεται. Η τιμή που αποκτά σε κάθε χρονική στιγμή είναι ανεξάρτητη από την ταχύτητα που έχει η μπάλα τη στιγμή εκείνη. Εξαρτάται μόνο από το βάρος της μπάλας και από το ύψος ως προς την οριζόντια επιφάνεια, την οποία θα προτιμήσουμε. Μπορούμε να διαλέξουμε την επιφάνεια μιας οποιασδήποτε ταράτσας ή και του εδάφους και να μετράμε τη δυναμική ενέργεια ως προς την επιφάνεια αυτή. Η μεταβολή όμως της δυναμικής ενέργειας ανάμεσα σε δυο χρονικές στιγμές είναι ανεξάρτητη από το *ποια* επιφάνεια αναφοράς χρησιμοποιήσαμε για τις μετρήσεις μας. Στο μεταξύ, κάθε μπαλάκι, από αυτά που ξέφυγαν και βρίσκεται προσγειωμένο σε ταράτσα ή στην άσφαλτο έχει δυναμική ενέργεια σταθερή.

Εφόσον οι διαστάσεις του σώματος δεν μας επιτρέπουν να το θεωρήσουμε υλικό σημείο, η τιμή της είναι το άθροισμα των δυναμικών ενεργειών των υλικών σημείων από τα οποία θεωρούμε ότι αποτελείται το σώμα. Τα μαθηματικά αποδεικνύουν ότι το άθροισμα αυτό είναι ίσο με το γινόμενο της όλης μάζας του σώματος επί τη βαρυτική επιτάχυνση επί την απόσταση $h_κ$ του κέντρου βάρους του σώματος, από την οριζόντια επιφάνεια. Κι αυτό ανεξάρτητα από το αν το σώμα μεταφέρεται, στρέφεται ή είναι ακίνητο.



2. Ας δούμε κάπως πιο προσεκτικά τη σχέση που υφίσταται ανάμεσα στη μεταβολή της δυναμικής ενέργειας και στο έργο του βάρους κατά τη διάρκεια της μεταβολής. Όταν το αντικείμενο ανυψώνεται, η δυναμική του ενέργεια αυξάνεται, πράγμα που σημαίνει ότι η μεταβολή της είναι θετική, ενώ το έργο του βάρους είναι αρνητικό. Όταν το αντικείμενο κινείται προς το έδαφος, η δυναμική του ενέργεια ελαττώνεται. Εδώ το έργο του βάρους είναι θετικό. Μπορούμε, δηλαδή, να λέμε ότι η μεταβολή της βαρυτικής δυναμικής ενέργειας είναι αντίθετη από το έργο του βάρους και να γράφουμε

$$\Delta U_\beta = -W_\beta$$



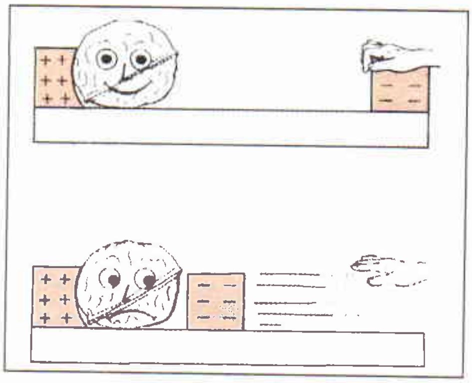
Η δυναμική ενέργεια του βαγονιού με τα παιδάκια ελαττώθηκε. Το έργο του βάρους είναι θετικό

$$W_\beta = mg(z_0 - z) \qquad \Delta U_\beta = -mg(z_0 - z)$$

3. Η βαρυτική δυναμική ενέργεια είναι μια έννοια γενικότερη. Δεν αφορά μόνο το σύστημα σώμα-Γη. Υφίσταται για οποιαδήποτε σύστημα σωμάτων του σύμπαντος, οι μάζες των οποίων αλληλεπιδρούν βαρυτικά, όπως για παράδειγμα το σύστημα Δίας-δορυφόρος του.

Η έννοια της δυναμικής ενέργειας επεκτείνεται και σε αλληλεπιδράσεις που δεν είναι βαρυτικές. Κάτι τέτοιο συμβαί-

νει με δύο ραβδόμορφους μαγνήτες των οποίων οι ετερώνυμοι πόλοι βρίσκονται αρχικά ο ένας κοντά στον άλλο και ύστερα από μια παρέμβαση –η οποία οπωσδήποτε απαιτεί έργο– απομακρύνεται λίγο περισσότερο. Το σύστημα των δύο μαγνητών στη νέα θέση έχει αυξημένη δυναμική ενέργεια σε σχέση με την προηγούμενη.



Το ίδιο ισχύει και για δύο αντικείμενα με ετερώνυμα ηλεκτρικά φορτία. Αν τα απομακρύνουμε η δυναμική ενέργεια του συστήματος θα αυξηθεί. Αν τα ηλεκτρικά φορτία (ή μαγνητικοί πόλοι) είναι ομώνυμα, η μεταβολή στη δυναμική ενέργεια λειτουργεί αντίθετα. Η δυναμική ενέργεια του συστήματος αυξάνεται καθώς τα πλησιάζουμε.
Να συνοψίσουμε.

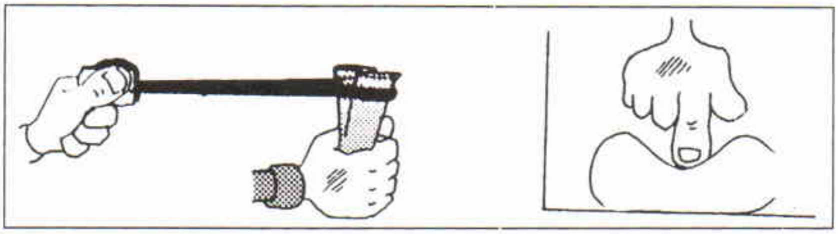
Σε κάθε σύστημα σωμάτων, τα οποία αλληλεπιδρούν και οι αλληλεπιδράσεις περιγράφονται με δυνάμεις διατηρητικές, αντιστοιχεί κάποια δυναμική ενέργεια, η οποία μπορεί, στη δική της γλώσσα, να αποδώσει αυτή την περιγραφή. Η τιμή της μεταβάλλεται εφόσον τα σώματα παρουσιάζουν σχετική μετακίνηση. Οι μεταβολές της σχετίζονται με το έργο ($W_{αλ}$) των δυνάμεων που περιγράφουν την αλληλεπίδραση, σύμφωνα με την εξίσωση:

$$\Delta U_{αλ} = -W_{αλ}$$

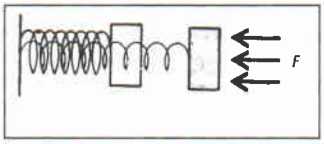
Η δυναμική ενέργεια αποτελεί το βασικότερο στοιχείο της μετανευτωνικής γλώσσας για την περιγραφή των αλληλεπιδράσεων, της γλώσσας εκείνης που δίνει στη δύναμη ένα ρόλο δευτερεύοντα.'

Ελαστική δυναμική ενέργεια

Τι συμβαίνει όμως με τη δυναμική ενέργεια που αποθηκεύτηκε στο τόξο του βασιλιά, στη σφεντόνα και στο ψαροντούφεκο; Πως μπορούμε να την υπολογίσουμε;
Εδώ, το ελατήριο θα αποτελέσει το μοντέλο μας.



Καθώς το ελατήριο βρίσκεται συσπειρωμένο έχει ελαστική δυναμική ενέργεια (U) ως προς το φυσικό του μήκος, ίση με το έργο το οποίο εκτελέστηκε για να συσπειρωθεί. Το ίδιο ισχύει και όταν είναι τεντωμένο.



$$U = \frac{1}{2} kx^2$$

όπου k η σταθερά του ελατηρίου και x η μεταβολή στο μήκος του σε σχέση με το φυσικό του μήκος.

Τίθεται βέβαια το ερώτημα: Που βρίσκονται σ' αυτή την περίπτωση οι αλληλεπιδράσεις;

Το ελατήριο δεν μπορούμε να το θεωρήσουμε υλικό σημείο αλλά ως ένα σύστημα από υλικά σημεία τα οποία αλληλεπιδρούν. Όταν βρίσκεται στο φυσικό του μήκος καθένα από αυτά ισορροπεί σε τέτοια θέση ώστε η συνισταμένη των δυνάμεων που ασκούνται από τα υπόλοιπα να είναι μηδέν. Όταν όμως, παραμορφωθεί αλλάζουν οι θέσεις και οι αποστάσεις μεταξύ τους και για να ισορροπήσουν χρειάζεται να ασκηθούν στο ελατήριο εξωτερικές δυνάμεις.

Κινητική χαρακτηρίζεται η ενέργεια την οποία έχει ένα σώμα λόγω της κίνησής του.
Βαρυτική δυναμική χαρακτηρίζεται η ενέργεια η οποία είναι αποθηκευμένη σε ένα αντικείμενο λόγω της θέσης του στο πεδίο βαρύτητας.
Ελαστική δυναμική χαρακτηρίζεται η ενέργεια η οποία είναι αποθηκευμένη σ' ένα σώμα λόγω της ελαστικής του παραμόρφωσης.

Η διατήρηση της μηχανικής ενέργειας

Η αντιπαράθεση

Μιλήσαμε κάπως ανεξάρτητα για κάθε ένα από τα δύο πρόσωπα της ενέργειας. Αξίζει τον κόπο να τα αντιπαραθέσουμε.

Η κινητική ενέργεια υπάρχει εφόσον και μόνο εφόσον υπάρχει κίνηση.

Είναι δυνατόν ένα σώμα να έχει κινητική ενέργεια, χωρίς να αλληλεπιδρά με τα υπόλοιπα σώματα. Η κίνησή του θα είναι ευθύγραμμη ομαλή.

Η κινητική ενέργεια μεταβάλλεται, εφόσον εκτελείται έργο από τη συνισταμένη των ασκουμένων δυνάμεων. Η μεταβολή της είναι ίση με αυτό το έργο.

$K_2 - K_1 = W_{ολ}\,(1,2)$

ή $ΔK = W_{ολ}$

Η δυναμική ενέργεια ενός συστήματος υπάρχει –εξ ορισμού–, εφόσον ανάμεσα στα μέρη που το αποτελούν υφίσταται αλληλεπίδραση που εκφράζεται με δυνάμεις διατηρητικές.

Είναι δυνατόν ένα σύστημα να έχει δυναμική ενέργεια, είτε υπάρχει είτε δεν υπάρχει κίνηση.

Η δυναμική ενέργεια μεταβάλλεται, εφόσον εκτελείται έργο ειδικά από τις διατηρητικές δυνάμεις που εκφράζουν την αλληλεπίδραση. Η μεταβολή της είναι αντίθετη από το έργο αυτών των δυνάμεων.

$U_2 - U_1 = -W_{αλ}\,(1,2)$

ή $-ΔU = W_{αλ}$

Βλέπουμε ότι η μεταβολή τόσο της μιας όσο και της άλλης μορφής συνδέεται με κάποιο έργο. Ας επιχειρήσουμε τώρα να παραμερίσουμε την έννοια *έργο* και να ερευνήσουμε αν οι μεταβολές της μιας μορφής ενέργειας επηρεάζουν τις μεταβολές της άλλης μορφής.

Το άθροισμα κινητικής και δυναμικής ενέργειας



Παρακολουθούμε ένα χιονοδρόμο που γλιστράει πάνω στο χιόνι και αφού αποκτήσει την κατάλληλη ταχύτητα πραγματοποιεί το μεγάλο άλμα. Καθώς «απογειώνεται», η κινητική του ενέργεια ελαττώνεται, ενώ αυξάνεται η δυναμική. Δεν είναι δύσκολο να το καταλάβουμε. Αρκεί να θυμηθούμε ότι η κινητική ενέργεια σχετίζεται με την ταχύτητα και η δυναμική (βαρυτική) με το ύψος. Από τη στιγμή πάλι που θα φτάσει στο μέγιστο ύψος και μετά, τα πράματα προχωρούν αντίθετα. Η κινητική του ενέργεια αυξάνεται και η δυναμική βαρυτική ενέργεια ελαττώνεται. Η συνολική διαπίστωση είναι σχετικά απλή. Κατά την κίνηση του σκιέρ η αύξηση της τιμής της μιας μορφής ενέργειας συνδυάζεται με ταυτόχρονη ελάττωση στην τιμή της άλλης. Το ερώτημα βέβαια είναι: η ελάττωση στην τιμή της μιας μορφής είναι ισόποση με την αύξηση στην τιμή της άλλης; Στη γλώσσα, δηλαδή, των συμβόλων, ισχύει $\Delta K = -\Delta U$;

Δύο τουλάχιστον δρόμους μπορούμε να διασχίσουμε για να φτάσουμε σε κάποια απάντηση. Ο πρώτος περνάει μέσα από συλλογιστικές διεργασίες, που ξεκινούν από τη σχέση του έργου με κάθε μία από τις μορφές ενέργειας. Ο δεύτερος είναι η «οδός πειράματος». Περιέχει έμπρακτες διαδικασίες με μετρήσεις και συνακόλουθα συμπεράσματα. Ας τους διασχίσουμε και τους δύο.

Οι συλλογισμοί. Ξεκινάμε από τις εξισώσεις $W_{ολ} = \Delta K$ και $W_{αλ} = -\Delta U$. Οι συλλογισμοί είναι απλοί. Αν $W_{ολ} = W_{αλ}$ θα είναι και $\Delta K = -\Delta U$, πράγμα που σημαίνει ότι αν το ολικό έργο που εκτελείται σε ένα σύστημα είναι μόνο το έργο των εσωτερικών διατηρητικών δυνάμεων, κάθε αύξηση της κινητικής ενέργειας θα συνοδεύεται από ισόποση ελάττωση της δυναμικής και αντίστροφα. Γράφουμε: $\Delta K = -\Delta U$ ή $K_2 - K_1 = -(U_2 - U_1)$ άρα

$$\mathbf{K_1 + U_1 = K_2 + U_2}$$

Με άλλα λόγια, στα συστήματα στα οποία κατά τη διάρ-

κεια ποικίλων αλλαγών εκτελείται έργο μόνο από τις διατηρητικές δυνάμεις που εκφράζουν την εσωτερική αλληλεπίδραση (όπως είναι το βάρος για παράδειγμα) υπάρχει πάντα κάποια ποσότητα που διατηρείται σταθερή· είναι το άθροισμα K+U, το άθροισμα κινητικής και δυναμικής ενέργειας.

Αν κατά την πτώση μιας πέτρας αγνοήσουμε την αντίσταση του αέρα, η μόνη *εργαζόμενη* δύναμη είναι το βάρος.

Καθώς, λοιπόν πέφτει η πέτρα η κινητική της ενέργεια αυξάνει, η δυναμική ενέργεια ελαττώνεται αλλά το άθροισμα κινητικής και δυναμικής ενέργειας πρέπει να διατηρείται σταθερό.

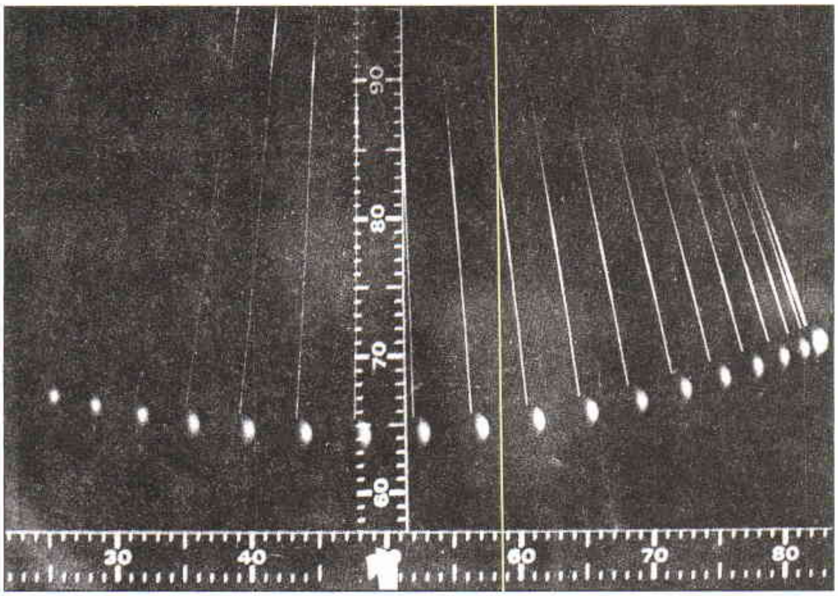
Καθώς απογειώνεται ο σκιέρ, αν αγνοήσουμε πάλι την αντίσταση του αέρα, η μόνη δύναμη που ασκείται πάνω του, άρα και η μόνη που εκτελεί έργο, είναι το βάρος. Το άθροισμα K+U παραμένει κι εδώ σταθερό.

Το ίδιο ισχύει και κατά την αιώρηση ενός εκκρεμούς. Από τις ασκούμενες στο σφαιρίδιο δυνάμεις μόνο το βάρος εκτελεί έργο.

Ανάλογοι συλλογισμοί και για την χωρίς τριβή κίνηση ενός σώματος σε κεκλιμένο επίπεδο –ή σε μια οποιαδήποτε στερεά επιφάνεια– θα οδηγήσουν σε παρόμοιο συμπέρασμα.

Ας δούμε όμως τι λέει και το πείραμα.

Το πείραμα. Να «ανακρίνουμε» τη φύση, να δούμε τι λέει για όλα αυτά. Το εκκρεμές είναι ένα μέσο, το οποίο γι' αυτή την περίπτωση προσφέρεται. Καθώς αιωρείται το εκκρεμές, επιχειρούμε να μετρήσουμε τις τιμές κινητικής και δυναμικής ενέργειας του σφαιριδίου στη διάρκεια μιας μόνο απλής αιώρησης. Για να το «προλάβουμε» χρησιμοποιούμε τη στροβοσκοπική μέθοδο. Το φωτογραφίζουμε φωτίζοντάς το με 20 αναλαμπές το δευτερόλεπτο. Πάνω στη φωτογραφία μπορούμε να εντοπίσουμε τις διαδοχικές θέσεις του σφαιριδίου και να μετρήσουμε την απόστασή τους Δs με υποδεκάμετρο. Επειδή ξέρουμε και ότι η παρεμβαλλόμενη χρονική διάρκεια είναι $\Delta t = 1/20$ s, μπορούμε να υπολογίσουμε την ταχύτητα του σφαιριδίου σε κάθε στιγμή.
Η τιμή της ταχύτητας θα μας οδηγήσει στην τιμή της κινητικής ενέργειας. Η μέτρηση, πάλι, με υποδεκάμετρο, του ύψους (h), στο οποίο βρίσκεται το σφαιρίδιο σε κάθε στιγμή, θα μας χρειαστεί για να υπολογίσουμε τη βαρυτική δυναμική ενέργεια. Χρειαζόμαστε βέβαια και την τιμή της μάζας.



Τι μας «είπε» το πείραμα; Οι μετρήσεις που έγιναν εμφάνισαν το άθροισμα $m\upsilon^2/2+mgh$ κατά τη διάρκεια μιας αιώρησης, να διατηρείται κατά προσέγγιση σταθερό. Οι μικρές αποκλίσεις από την ακρίβεια μας θυμίζουν ότι στις έμπρακτες πειραματικές διαδικασίες συμμετέχει πάντοτε και ο παράγων σφάλμα. Μπορούμε, δηλαδή, να πούμε ότι μέσα στα όρια του σφάλματος το πείραμα δείχνει να συμφωνεί με τα συμπεράσματα των συλλογισμών που προηγήθηκαν.

Η μηχανική ενέργεια διατηρείται

Φτάσαμε σε κάποια απάντηση του αρχικού ερωτήματος ακολουθώντας δύο δρόμους διαφορετικούς. Το τελικό μας συμπέρασμα αναφέρεται στα λεγόμενα *κλειστά συστήματα*, συστήματα, δηλαδή, που δεν αλληλεπιδρούν με τον υπόλοιπο κόσμο. Να το διατυπώσουμε.

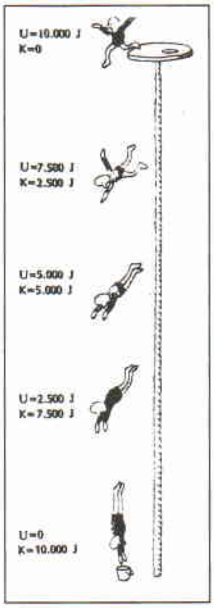
Σε κάθε κλειστό σύστημα, στο οποίο εμφανίζονται μόνο εσωτερικές δυνάμεις διατηρητικές, το άθροισμα κινητικής και δυναμικής ενέργειας διατηρείται σταθερό.

Είναι αυτονόητο, ότι στα συστήματα αυτά –τα λεγόμενα και διατηρητικά– δεν εμφανίζονται δυνάμεις σαν την τριβή ή

την αντίσταση του αέρα ούτε και παρεμβάσεις, που θα μπορούσαν να προέρχονται από ανθρώπους ή από μηχανές. Τα παραδείγματα που αναφέρθηκαν είναι ενδεικτικά.

Το άθροισμα κινητικής και δυναμικής ενέργειας συνηθίζεται να αναφέρεται ως *ενέργεια μηχανική* ($E_μ$). Η διατήρηση της μηχανικής ενέργειας κατάγεται από τη νευτωνική δυναμική. Αποτελεί ένα εργαλείο για τη μελέτη προβλημάτων, που θα μπορούσαν να αντιμετωπιστούν και με νευτωνική μέθοδο. Πολλές φορές, όμως, η χρήση του ενεργειακού εργαλείου είτε μας οδηγεί πιο απλά στο αποτέλεσμα είτε είναι απολύτως αναγκαίο καταφύγιο για τη λύση των προβλημάτων.

Για την περίπτωση που η δυναμική ενέργεια είναι βαρυτική, μπορούμε να αναφερόμαστε σε διατήρηση της μηχανικής ενέργειας του σώματος ως προς τη Γη.



Εφόσον το σώμα θεωρείται σημειακό αντικείμενο, για δύο οποιεσδήποτε χρονικές στιγμές της κίνησης, θα ισχύει:

$$\frac{1}{2} m\upsilon_1^2 + mgh_1 = \frac{1}{2} m\upsilon_2^2 + mgh_2$$

όπου m η μάζα του κινουμένου σώματος, υ_1 και υ_2 οι τιμές της ταχύτητάς του και h_1, h_2 τα ύψη από κάποια οριζόντια επιφάνεια στα οποία βρίσκεται κατά τις δύο αυτές χρονικές στιγμές.

Προκύπτει όμως το ερώτημα· υπάρχουν στη φύση διατηρητικά συστήματα;

Απαντάμε απ' ευθείας. Στον μακρόκοσμο που ζούμε τέτοια συστήματα δεν υπάρχουν*. Τα συστήματα αυτά είναι μοντέλα. Σε πολλές όμως περιπτώσεις μπορούμε να θεωρήσουμε ότι το πραγματικό σύστημα προσεγγίζει το μοντέλο μας. Το απλό εκκρεμές με το οποίο πειραματιστήκαμε, ένα βαρύ σώμα που πέφτει προς το έδαφος, ο χιονοδρόμος ή το τραινάκι του λούνα παρκ αποτελούν συστήματα στα οποία δεν είναι «σκανδαλώδες» να δεχτούμε διατήρηση της μηχανικής ενέργειας, τουλάχιστον για κάποια μικρή χρονική διάρκεια.

* Στον μικρόκοσμο φαίνεται ότι όλες οι αλληλεπιδράσεις ανάμεσα σε ζευγάρια σωματιδίων όπως είναι τα άτομα, ιόντα, ηλεκτρόνια, μόρια, νουκλεόνια είναι διατηρητικές.

Η μηχανική ενέργεια ελαττώνεται

Μια φαινομενική εξαφάνιση

Όπως, όμως, και να το κάνουμε οι τριβές και οι αντιστάσεις υπάρχουν. Το εκκρεμές θα σταματήσει οπωσδήποτε. Η μηχανική ενέργεια του σώματος που γλιστράει πάνω στο «λείο» κεκλιμένο επίπεδο, βαθμιαία θα ελαττώνεται. Αν αφήσουμε ένα μπαλάκι του τένις από κάποιο ύψος, στις διαδοχικές αναπηδήσεις του θα ανεβαίνει σε ύψη ολοένα μικρότερα, μήνυμα ότι η μηχανική του ενέργεια μειώνεται συνεχώς. Αν αφήσουμε το γκάζι σε οριζόντιο οδόστρωμα, το αυτοκίνητο θα σταματήσει· αυτό είναι βέβαιο.



Καθώς ο αλεξιπτωτιστής εγκαταλείπει το αεροπλάνο, έχει την ταχύτητα του αεροπλάνου. Ευτυχώς γι' αυτόν, η μηχανική του ενέργεια ελαττώνεται, γιατί αν ίσχυε η διατήρηση θα έφτανε στο έδαφος με ταχύτητα μεγαλύτερη από την ταχύτητα αεροπλάνου.

Υπάρχει δηλαδή μια σειρά από βεβαιότητες-μηνύματα, τα οποία μας λένε ότι –εφόσον κάποιος άνθρωπος ή μηχανή δεν προσφέρει έργο– το άθροισμα U+K ελαττώνεται, η μηχανική ενέργεια φαίνεται να εξαφανίζεται. Αυτή η φαινομενική εξαφάνιση της μηχανικής ενέργειας *κάτι αφήνει πίσω της*. Στη θέση της εμφανίζεται *κάτι* που δεν είναι πάντα αντιληπτό από τις αισθήσεις μας. Βέβαια στις περιπτώσεις που οι τριβές και οι αντιστάσεις είναι μεγάλες, το αντιλαμβανόμαστε και μάλιστα πολύ καλά. Τα παιδιά που κάνουν τσουλήθρα στην παιδική χαρά και πιάνουν το σίδερο το ξέρουν. Το ξέρει και ο τορναδόρος καθώς κόβει το μέταλλο. Το καταλαβαίνουμε, μόλις ακουμπήσουμε το λάστιχο του αυτοκινήτου ύστερα από οδήγηση σε κατηφορικό δρόμο στην οποία φρενάραμε σαν πρωτάρηδες. Αυτό το *κάτι* εκδηλώνεται σαν **αύξηση της θερμοκρασίας**. Κι

όπως λένε οι φυσικοί, τα τελευταία εκατόν σαράντα χρόνια και μετά, η φαινομενική εξαφάνιση της μηχανικής ενέργειας δεν είναι εξαφάνιση. Είναι **μετατροπή σε μια άλλη μορφή** ενέργειας, για την οποία, από τα πειράματα του J.P. Joule (στη δεκαετία του 1840) και μετά, ισχυριζόμαστε ότι είναι ισοδύναμη με την ενέργεια που χάθηκε.

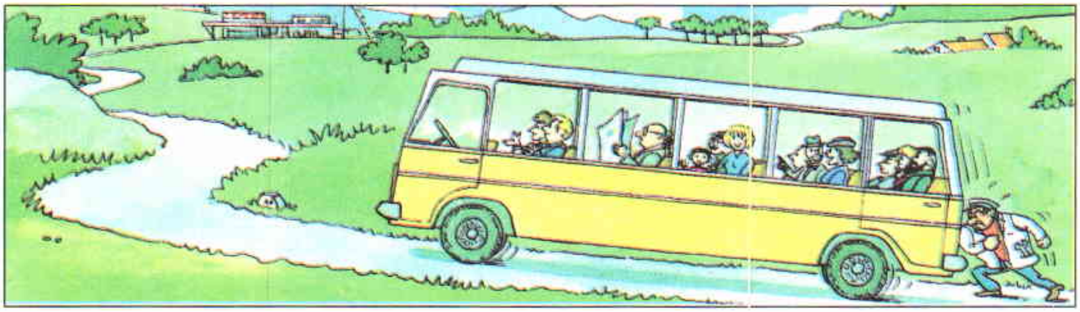
Η ενέργεια, δηλαδή, δεν χάθηκε. Μετατράπηκε και μεταφέρθηκε. Η σχέση ανάμεσα στις θερμοκρασιακές μεταβολές και στην ενέργεια που χάθηκε –χωρίς να έχει χαθεί– είναι ένα ζήτημα θεμελιακό και θα ασχοληθούμε μαζί του διεξοδικά. Για την ώρα, όμως, θα μας απασχολήσει ένα άλλο *κάτι* που μπορεί να προκαλέσει αύξηση της μηχανικής ενέργειας.

Αύξηση της μηχανικής ενέργειας

Μια φαινομενική αύξηση

Ο άνθρωπος

Ο άνθρωπος είναι σε θέση να ανυψώνει ορισμένα βάρη. Μπορεί, πάλι, σπρώχνοντας, εκτοξεύοντας ή κλοτσώντας ένα σώμα να του μεταβιβάζει ενέργεια. Είναι μ' άλλα λόγια σε θέση να αυξήσει τη μηχανική ενέργεια ενός συστήματος.





1. Στη νευτωνική γλώσσα των δυνάμεων είπαμε ότι έχει τη δυνατότητα να ασκεί μυικές δυνάμεις ώστε να εκτελεί το έργο που απαιτείται για τον σκοπό αυτό. Κι αυτό το πετυχαίνει είτε απ' ευθείας, σπρώχνοντας δηλαδή το αυτοκίνητο που χάλασε, είτε έμμεσα, παρεμβάλλοντας δηλαδή ανάμεσα στον εαυτό του και το σύστημα μια απλή μηχανή, χωρίς να κερδίσει σε έργο, όπως έχουμε πει. Για τον χειρώνακτα εργάτη τέτοιου είδους διαδικασίες, με τον έναν ή τον άλλον τρόπο, αποτελούν γεγονότα συνηθισμένα και καθημερινά. Σ' όλες βέβαια τις περιπτώσεις υπάρχει μία κοινή συνέπεια. Οι άνθρωποι κουράζονται.

2. Μια μικρή ταμπέλα προειδοποιεί ότι το ασανσέρ χάλασε. Η γυναίκα, φορτωμένη μια βαριά σακούλα με φρούτα α-

πό τη λαϊκή αγορά, ανεβαίνει με τα πόδια στον τρίτο όροφο. Αν αδιαφορήσουμε για τη γυναίκα προσωρινά και ασχοληθούμε μόνο με τη βαριά σακούλα, θα πούμε ότι, από το ισόγειο μέχρι τον τρίτο όροφο, η δυναμική της ενέργεια αυξήθηκε. Ας ασχοληθούμε όμως και με τη γυναίκα. Ανέβηκε στο διαμέρισμά της, παράτησε τη βαριά σακούλα κατάχαμα και κάθεται σε μια καρέκλα να ξαποστάσει. Αυτό που μπορούμε να πούμε περιγράφοντας ολόκληρο το σύστημα γυναίκα-σακούλα, είναι ότι ύστερα από το ανέβασμα στον τρίτο όροφο τα δύο σώματα είναι, κατά κάποιον τρόπο, σε μια κατάσταση διαφορετική. Κανένα δεν είναι πια όπως πριν. Η σακούλα με τα φρούτα «κέρδισε» σε δυναμική ενέργεια. Και η γυναίκα φυσικά. Στη γυναίκα συμβαίνει, όμως, κάτι που δεν συμβαίνει, βέβαια, στη σακούλα. Κουράστηκε. Τα πράγματα δείχνουν –κι αυτό συμβαίνει σε κάθε ανθρώπινη προσπάθεια– σαν η γυναίκα να ξόδεψε κάτι για να καταφέρει αυτό που θα γινόταν άκοπα, αν δεν είχε χαλάσει το ασανσέρ.

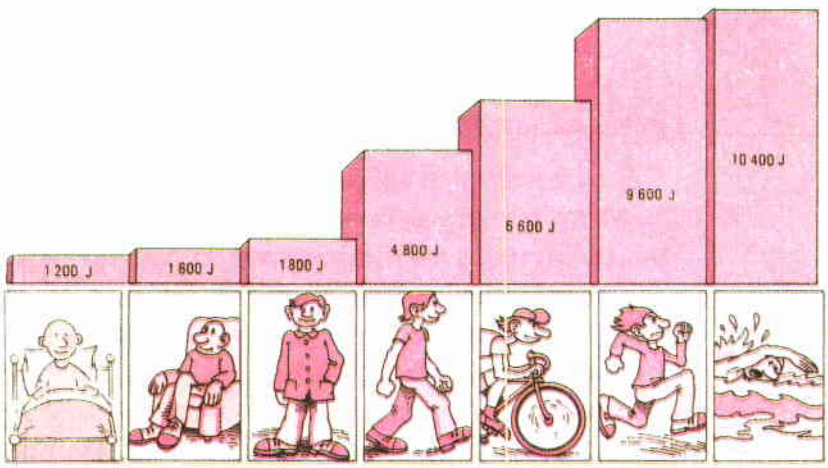


Αυτό το *κάτι* που ξόδεψε για να ανεβάσει τη σακούλα και τον εαυτό της στον τρίτο όροφο, οι φυσικές επιστήμες μας προτείνουν να δεχτούμε ότι είναι ενέργεια. Η πρόταση «ακούγεται» παράξενα. Γιατί αυτό που ξοδεύτηκε, δε φαίνεται να μοιάζει ούτε με κίνηση ούτε με αλλαγή σε διάταξη των μερών ενός συστήματος, με καμιά δηλαδή από τις δύο μορφές ενέργειας που περιγράψαμε. Κι εφόσον διατηρούμε μια *μακροσκοπική θεώρηση* των πραγμάτων, έχουμε δίκιο να θεωρούμε την πρόταση παράξενη. Αν όμως θελήσουμε να κοιτάξουμε αυτά που συμβαίνουν στον οργανισμό μας από σκοπιά μικροσκοπική, από τη σκοπιά, δηλαδή, που αντικρύζει τα μόρια και τα άτομα, θα δούμε ότι οι καύσεις

που γίνονται μέσα μας και μας εφοδιάζουν με τη δυνατότητα να σηκώνουμε βάρη και να εκτοξεύουμε αντικείμενα είναι ενεργειακές διαδικασίες, που σήμερα περιγράφονται με όρους κινητικής και δυναμικής ενέργειας των ατόμων. Προς το παρόν θα αρκεστούμε στο να λέμε ότι η ενέργεια που ξοδεύουμε προέρχεται από τις τροφές κι έχει τη μορφή **ενέργειας χημικής.**

3. Στη νευτωνική γλώσσα λέμε ότι ο άνθρωπος μπορεί και τα πετυχαίνει όλα αυτά, γιατί έχει τη δυνατότητα να ασκεί μυικές δυνάμεις. Στη γλώσσα της ενέργειας λέμε ότι καταφέρνει να αυξάνει την ενέργεια ενός σώματος (ή και του ίδιου του σώματός του), επειδή διαθέτει αποθηκευμένη τροφοενέργεια, ενέργεια που μπορεί να χαρακτηριστεί ως χημική. Είναι εκείνη η ενέργεια που ελαττώνεται, όταν ο άνθρωπος εκτελεί έργο αξιοποιώντας τις μυικές του δυνατότητες. Η εκδήλωση μάλιστα του κόπου συνδέεται με αυτήν ακριβώς την ελάττωση.

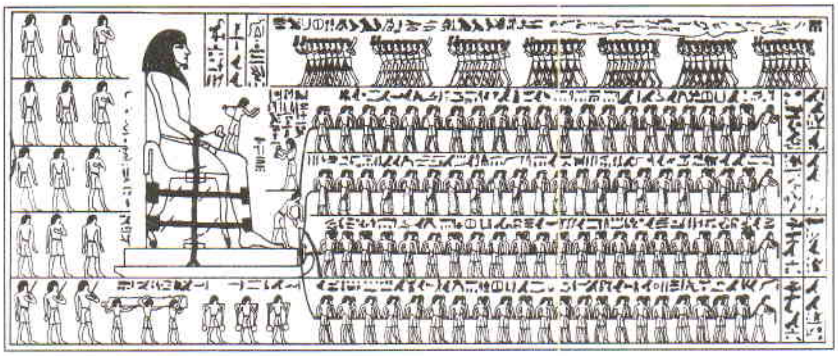
4. Το ίδιο το έργο που εκτελεί ο άνθρωπος, μπορεί να μετρήσει τη χημική ενέργεια, που ξοδεύτηκε για να πραγματοποιηθεί. Εννοείται ότι καθώς εκτελεί αυτό το έργο ο ανθρώπινος οργανισμός, καταναλώνει κι άλλη ποσότητα χημικής ενέργειας, αναγκαία για τις λειτουργίες του.



Ο άνθρωπος ξοδεύει την αποθηκευμένη χημικού τύπου τροφοενέργεια ακόμα κι όταν ξαπλώνει, στέκεται όρθιος, περπατάει, κάνει ποδήλατο, τρέχει, κολυμπάει, την οποία φυσικά αναπληρώνει με τις τροφές. Ένα καλό γεύμα είναι ό,τι πρέπει ύστερα από ένα μπάνιο στη θάλασσα. Στον πίνακα παρουσιάζονται οι τιμές χημικής ενέργειας που ξοδεύονται κατά περίπτωση μέσα σ' ένα μόνο λεπτό δραστηριότητας.

Η μηχανή

Ένα βαρύ αντικείμενο μπορεί να ανυψωθεί και με ελάχιστη ανθρώπινη παρέμβαση. Αρκεί κανείς να διαθέτει μια *μηχανή*. Έναν βενζινοκίνητο, λόγου χάριν, γερανό και μια ποσότητα από καύσιμο. Ο γερανός θα αυξήσει τη μηχανική ενέργεια του αντικειμένου, θα προκαλέσει μια *φαινομενική* εμφάνιση μηχανικής ενέργειας η οποία δεν υπήρχε πριν, καταναλώνοντας φυσικά το απαραίτητο καύσιμο.



Η επιστήμη μίλησε πολύ καθυστερημένα για τις μηχανές. Τον 19ο αιώνα, χρησιμοποιώντας την καινούρια τότε γλώσσα της ενέργειας, γνωμάτευσε ότι είναι αδύνατον να κατασκευαστεί μια μηχανή που να μας δίνει ενέργεια περισσότερη απ' όση –στον ίδιο χρόνο– της παρέχουμε. Η μηχανική ενέργεια, για παράδειγμα, που μπορούμε να πάρουμε σε ορισμένο χρόνο από μια ατμομηχανή είναι οπωσδήποτε λιγότερη από την ενέργεια που θα καταναλώσουμε στον ίδιο χρόνο για να το πετύχουμε.

Ένα μέγεθος που μπορεί και όλα αυτά να τα εκφράσει καλύτερα, αλλά και να *βαθμολογήσει* τις δυνατότητες μιας μηχανής είναι **η ισχύς**, το πηλίκο, δηλαδή, της μεταβιβαζόμενης ενέργειας προς το χρόνο, στον οποίο μεταβιβάστηκε. Εφόσον η μεταβιβαζόμενη ενέργεια μπορεί να μετρηθεί με κάποιο έργο, είναι δυνατόν να ορίσουμε την ισχύ (P) και ως πηλίκο αυτού του έργου (W) προς τον χρόνο (t) στον οποίο εκτελέστηκε.

$$\mathbf{P = \frac{W}{t}}$$

Ο ορισμός αυτός ισχύει εφόσον η ενέργεια μεταβιβάζεται με σταθερό ρυθμό.
Το καινούριο μέγεθος εκφράζει το ρυθμό με τον οποίο αποδίδεται ή προσφέρεται ενέργεια. Για τη μονάδα μέτρησης, στο Διεθνές Σύστημα, χρησιμοποιείται το όνομα του James Watt, του Σκωτσέζου που βελτίωσε την ατμομηχανή, διαδραματίζοντας ένα πρωτεύοντα ρόλο στην εξέλιξη της Βιομηχανικής Επανάστασης. 1 W (1 Βατ) λέγεται η ισχύς που αντιστοιχεί σε 1 Joule ανά δευτερόλεπτο. 1 W = 1 J/s.

Την ισχύ που μας δίνει μια μηχανή καθώς λειτουργεί, τη χαρακτηρίζουμε *ωφέλιμη* –$P_{ωφ}$–, ενώ την ισχύ με την οποία την τροφοδοτούμε τη λέμε *καταναλισκόμενη* –$P_{κατ}$–. Ο λόγος $α = P_{ωφ}/P_{κατ}$ αποτελεί τον συντελεστή αποδόσεως της μηχανής. Είναι ένας αριθμός πάντα μικρότερος από τη μονάδα, που εκφράζει την ποιότητα της μηχανής από την άποψη της εκμετάλλευσης της προσφερόμενης ενέργειας.

Τιμές ισχύος

Βιολογικά συστήματα		**Κινητήρες**	
Καρδιά ανθρώπου	3 W	Αυτοκινήτου	10 kW ως 200 kW
Άνθρωπος, ο οποίος		Τραίνου	1000 kW ως 6000 kW
είναι ακίνητος	17 W	Αεροπλάνου Boeing 707	21000 kW
εργάζεται	50 W ως 100 W	Πυραύλου	1.000.000 kW
κινείται με 3,2 km/h	750 W	**Ηλεκτρικές συσκευές**	
τρέχει σε αγώνες στίβου	1.700 W	Ξυριστική μηχανή	10 W
		Ψυγείο	150 W
Έντομο όταν πετάει	μέχρι 1 mW	Θερμοσίφωνας	1000 W ως 4.000 W
Δελφίνι που κολυμπάει	210 W	Ηλεκτρική κουζίνα	5000 W ως 8.000 W
Άλογο που εκτελεί έργο	1000 W	Τηλεόραση μαυρόασπρη	300 W
		Έγχρωμη τηλεόραση	500 W

Ερωτήσεις και προβλήματα

- Αν σε κάποιο πρόβλημα χρειαστείτε το μέτρο της βαρυτικής επιτάχυνσης να το θεωρήσετε γνωστό και ίσο με 10 m/s^2.
- Οι όροι *αντικείμενο* και *σφαιρίδιο*, υποδηλώνουν *σημειακό αντικείμενο*.
- Η αντίσταση του αέρα θεωρείται αμελητέα εφόσον δεν αναφέρεται κάτι διαφορετικό.



4.1. Χρησιμοποιώντας ένα μοχλό μπορούμε να μεγαλώσουμε κάποια δύναμη. Πώς θα τα καταφέρουμε; Τι είναι αυτό το οποίο αποκλείεται να το μεγαλώσουμε με τον μοχλό;

4.2. Πώς ορίζεται η μονάδα 1 Joule;

4.3. Η ποσότητα καυσίμου που καταναλώνεται για την ανύψωση ενός αντικειμένου είναι ανάλογη προς το έργο της δύναμης που απαιτείται για την ανύψωση αυτή. Πώς μπορούμε να το αποδείξουμε εμπειρικά; Περιγράψτε τη διαδικασία.

4.4. Το έργο μιας δύναμης είναι ποσότητα μεταβιβαζόμενης ενέργειας. Αν το έργο είναι θετικό, ποιός μεταβιβάζει ενέργεια; Σε ποιον τη μεταβιβάζει; Τι συμβαίνει αν το έργο της δύναμης είναι αρνητικό;

4.5. Πώς ορίζεται το έργο μιας σταθερής δύναμης σε ευθύγραμμη κίνηση;

4.6. Τι σημαίνει ο όρος *διατηρητική δύναμη*; Αναφερθείτε στο παράδειγμα μιας δύναμης η οποία δεν είναι διατηρητική.

4.7. Ποια είναι η σχέση έργου και κινητικής ενέργειας;

4.8. Τι συμβαίνει όταν σε ένα αντικείμενο ασκείται (συνισταμένη) δύναμη και η κινητική του ενέργεια διατηρείται σταθερή;

4.9. Η βαρυτική δυναμική ενέργεια ενός σώματος είναι ίση με το γινόμενο του βάρους του σώματος επί το ύψος στο οποίο βρίσκεται. Ποιο ακριβώς είναι αυτό το ύψος;

4.10. Ποια είναι η σχέση ανάμεσα στο έργο του βάρους και στη μεταβολή της βαρυτικής δυναμικής ενέργειας;

4.11. Περιγράψτε δύο φαινόμενα κατά την εξέλιξη των οποίων μπορούμε να θεωρήσουμε ότι η μηχανική ενέργεια διατηρείται.

4.12. Περιγράψτε δύο φαινόμενα κατά την εξέλιξη των οποίων μπορούμε να θεωρήσουμε ότι η μηχανική ενέργεια ελαττώνεται.

4.13. Όταν ανεβαίνει κάποιος με τα πόδια στον τρίτο όροφο η μηχανική του ενέργεια αυξάνεται. Από που προέρχεται αυτή η αύξηση;

4.14. Τι λέγεται ισχύς;

4.15. Ποια είναι η μονάδα μέτρησης της ισχύος; Πώς ορίζεται;



Να αναρωτηθούμε...

4.16. Ανυψώνουμε μια πέτρα βάρους 50 N με τη βοήθεια μοχλού. Στο ένα άκρο Α του μοχλού ασκούμε δύναμη 5 N και το

μετατοπίζουμε κατά 2 εκατοστά. Η πέτρα βρίσκεται στο άλλο άκρο.
α) Η μεταβιβαζόμενη στο άκρο Α ενέργεια είναι 0,1 J
β) Η ενέργεια που μεταβιβάζεται στην πέτρα είναι 0,1 J
γ) Η πέτρα ανυψώνεται κατά 10 εκατοστά
δ) Το έργο της δύναμης την οποία ασκούμε στο άκρο Α είναι 0,1 J
Αν οι ενεργειακές απώλειες θεωρηθούν αμελητέες, με ποια από τα παραπάνω συμφωνείτε;

4.17. Ποιο από τα παρακάτω μεγέθη δεν είναι διανυσματικό:
α) έργο β) δύναμη γ) μετατόπιση δ) ορμή ε) ταχύτητα.

4.18. Ποιες από τις παρακάτω δυνάμεις εκτελούν αρνητικό έργο; Ποιες δεν εκτελούν έργο;
α) Βάρος ενός σώματος σε οριζόντια μετακίνηση.
β) Δύναμη που ασκεί ένα ελατήριο καθώς συμπιέζεται
γ) Δύναμη που ασκεί το τεντωμένο νήμα στο σφαιρίδιο εκκρεμούς.
δ) Τριβή ολίσθησης
ε) Δύναμη στήριξης.

4.19. Ένα αντικείμενο κινείται ευθύγραμμα με σταθερή επιτάχυνση.
α) Το έργο της ασκούμενης σ' αυτό δύναμης (συνισταμένης) είναι οπωσδήποτε θετικό.
β) Η γωνία των διανυσμάτων δύναμης (συνισταμένης) και μετατόπισης είναι οπωσδήποτε μηδέν.
γ) Στο κινούμενο αντικείμενο διαρκώς μεταβιβάζεται ενέργεια.
Με ποια από αυτά συμφωνείτε;

4.20. Αναφέρετε δικά σας παραδείγματα κατά τα οποία δεν εκτελείται έργο σε περιπτώσεις στις οποίες:
α) Σ' ένα σώμα ασκείται δύναμη και δεν υπάρχει μετατόπιση.
β) Υπάρχει μετατόπιση, χωρίς να ασκείται δύναμη.
γ) Ασκείται δύναμη, διαρκώς κάθετη στην ταχύτητα.

4.21. Η κινητική ενέργεια ενός αντικειμένου
α) Είναι κάθε στιγμή ίση με το γινόμενο της μάζας του αντικειμένου επί το τετράγωνο της ταχύτητάς του.
β) Αυξάνει κατά την ελεύθερη πτώση των αντικειμένων.
γ) Μπορεί να είναι μηδέν και ταυτόχρονα να μην είναι μηδέν ανάλογα με το σύστημα αναφοράς.
δ) Είναι, όπως και η ορμή, μέγεθος διανυσματικό.
ε) Είναι ίση με 8 N εφόσον το αντικείμενο έχει μάζα 1 kg και ταχύτητα 4 m/s.
Με ποια από τα παραπάνω διαφωνείτε;

4.22. Ένα σώμα ολισθαίνει κατά μήκος κεκλιμένου επιπέδου κατερχόμενο με σταθερή ταχύτητα. Ποιες από τις ασκούμενες δυνάμεις εκτελούν έργο θετικό και ποιες αρνητικό; Πώς μπορούμε να υπολογίσουμε το ολικό έργο;

4.23. Ποια από τα παρακάτω όργανα χρειαζόμαστε για να μετρήσουμε τη δυναμική ενέργεια ενός σφαιριδίου ως προς το έδαφος;
α) χρονόμετρο β) ζυγό γ) μετροταινία.
Πώς θα γίνει η μέτρηση;

4.24. Η βαρυτική δυναμική ενέργεια ενός αντικειμένου
α) Αυξάνεται καθώς το αντικείμενο πέφτει προς το εδαφος.
β) Έχει ως μονάδα μετρήσεως το ένα τζάουλ.
γ) Μεταβάλλεται καθώς το αντικείμενο μετακινείται σε οριζόντιο δάπεδο.
δ) Έχει νόημα μόνο όταν το αντικείμενο είναι ακίνητο.
ε) Μεταβάλλεται καθώς το αντικείμενο

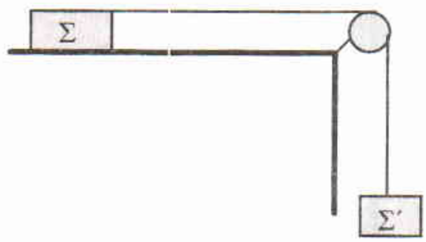
μετακινείται προς τα πάνω και η μεταβολή της είναι ίση με το έργο του βάρους.
Με ποια από αυτά διαφωνείτε; Δικαιολογήστε την απάντηση.

4.25. Σας ζητούμε να συμπληρώσετε τα κενά επιλέγοντας από τα παρακάτω:
60 N, 1,2 mJ, ΜΙΚΡΗ, 22 cm, ΔΥΝΑΜΙΚΗ, ΔΥΝΑΜΗ, ΙΣΧΥΣ, ΜΕΓΑΛΗ, 26 cm, ΕΛΑΣΤΙΚΗ, 3 N, ΚΙΝΗΤΙΚΗ, ΑΠΟΘΗΚΕΥΜΕΝΗ, 3 J, 6 N, ΕΝΕΡΓΕΙΑ, 120 mJ.
Ένα ελατήριο σταθεράς 1,5 N/cm έχει φυσικό μήκος .... Στερεώνουμε το ένα άκρο σε κατακόρυφο τοίχωμα και αρχίζουμε να το συμπιέζουμε αργά ασκώντας οριζόντια .... στο άλλο άκρο. Καθώς προχωρά η συμπίεση, η δύναμη την οποία ασκεί το ελατήριο στο χέρι μας γίνεται όλο και πιο .... Σε κάποια στιγμή που το έχουμε ήδη συμπιέσει κατά 4 cm το μήκος του είναι 22 cm και η δύναμη την οποία ασκούμε είναι ίση με .... Η ελαστική .... ενέργεια την οποία μέχρι εκείνη τη στιγμή έχει αποθηκεύσει το ελατήριο είναι ....

4.26. Στο άκρο ενός νήματος προσδένουμε ένα σφαιρίδιο και δημιουργούμε ένα εκκρεμές το οποίο ενεργοποιούμενο αιωρείται. Κατά τη διάρκεια μιας αιώρησης:
α) Καθώς το σφαιρίδιο κατέρχεται η κινητική του ενέργεια συνεχώς αυξάνεται.
β) Το άθροισμα κινητικής και δυναμικής ενέργειας διατηρείται σταθερό.
γ) Από τις δυνάμεις που ασκούνται στο σφαιρίδιο η μόνη που εκτελεί έργο είναι το βάρος.
δ) Όταν το νήμα βρεθεί στην κατακόρυφη θέση η δυναμική του ενέργεια έχει τη μικρότερη τιμή.
ε) Η μόνη δύναμη που ασκείται στο σφαιρίδιο είναι το βάρος του.
Οι τριβές και οι αντιστάσεις θεωρούνται αμελητέες.
Με ποια από αυτά συμφωνείτε;

4.27. Δύο αντικείμενα ίσων μαζών, το M_1 και το M_2 αφήνονται ταυτόχρονα από το ίδιο ύψος να ολισθήσουν σε δύο διαφορετικά κεκλιμένα επίπεδα γωνιών 30° και 45° αντίστοιχα. Αν η τριβή θεωρηθεί αμελητέα με ποια από τις παρακάτω προτάσεις διαφωνείτε;
α) Η κινητική ενέργεια που έχει το M_1 όταν φτάσει στο έδαφος είναι ίση με την κινητική ενέργεια που έχει το M_2 όταν φτάνει στο έδαφος.
β) Το M_2 φθάνει στο έδαφος πριν από το M_1.
γ) Την ίδια χρονική στιγμή τα δύο κινούμενα αντικείμενα έχουν πάντα την ίδια δυναμική ενέργεια ως προς το έδαφος.
δ) Η ταχύτητα με την οποία το M_1 φθάνει στο έδαφος είναι ίση κατά μέτρο με την ταχύτητα με την οποία το M_2 φθάνει στο έδαφος.

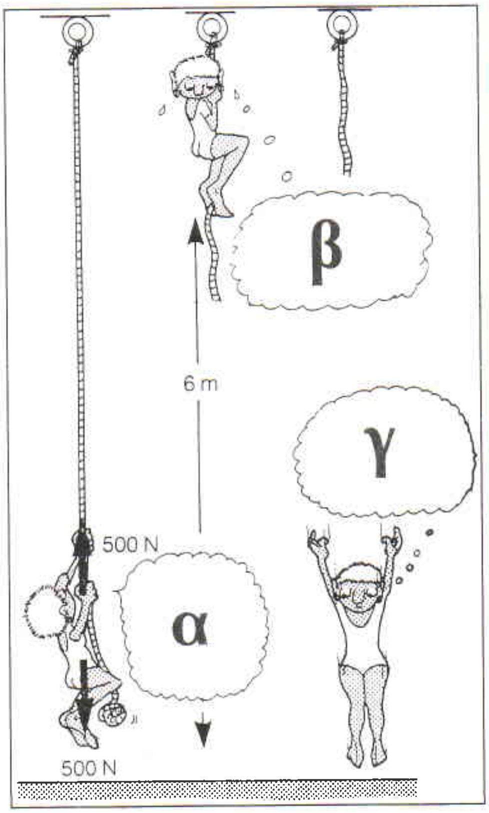
4.28. Τα αντικείμενα Σ και Σ′ συνδέονται με νήμα μέσω τροχαλίας όπως στο σχήμα. Συγκρατούμε το Σ και στη συνέχεια το αφήνουμε ελεύθερο. Παρατηρούμε την κίνηση των δύο αντικειμένων μέχρις ότου το Σ φτάσει στην τροχαλία. Τριβή αμελητέα.



α) Η δυναμική ενέργεια του Σ′ συνεχώς αυξάνει.
β) Η μηχανική ενέργεια του Σ διατηρείται σταθερή.
γ) Το έργο της δύναμης την οποία ασκεί το τεντωμένο νήμα στο Σ′ είναι αρνητικό.
δ) Το έργο της δύναμης την οποία ασκεί το τεντωμένο νήμα στο Σ είναι θετικό.

ε) Η μηχανική ενέργεια του συστήματος των δύο αντικειμένων παραμένει σταθερή.
στ) Η κινητική ενέργεια του Σ' διαρκώς αυξάνει.
Με ποια από αυτά συμφωνείτε;

4.29. α. Για να σκαρφαλώσω μέχρι πάνω πρέπει να αυξήσω τη δυναμική μου ενέργεια κατά ....
β. Χρειάστηκε να ασκώ συνεχώς δύναμη .... Νιούτον. Το σώμα μου έχει τώρα .... τζάουλ δυναμικής ενέργειας.
γ. Τώρα έχω .... τζάουλ κινητικής ενέργειας. Τι θα τα κάνω; Προβλέπω αύξηση της .... ενέργειας. Ελπίζω να μη σπάσω κανένα πόδι.
Σας ζητούμε να συμπληρώσετε τα κενά.



4.30. Βάζουμε νερό σ' ένα δοχείο μέχρι κάποιο ύψος. Ύστερα παίρνουμε ένα κομμάτι φελλού, το τοποθετούμε μέσα στο νερό και το αφήνουμε. Ο φελλός αρχίζει να ανεβαίνει. Καθώς ανεβαίνει και βρίσκεται ολόκληρος μέσα στο υγρό, ισχυριζόμαστε ότι η δυναμική ενέργεια του νερού μεταβάλλετοι. Προσπαθήστε να το δικαιολογήσετε.

4.31. Ένα παιδί κάνει τσουλήθρα. Καθώς γλιστράει προς τα κάτω
α) Η δυναμική του ενέργεια διατηρείται σταθερή.
β) Η μηχανική του ενέργεια ελαττώνεται.
γ) Η ασκούμενη στο παιδί τριβή ολίσθησης έχει έργο αρνητικό.
δ) Αυξάνεται η θερμοκρασία.
Με ποιο από αυτά διαφωνείτε;

4.32. Κάποιος διαθέτει μετροταινία, ζυγό φαρμακείου και χρονόμετρο. Πώς θα μπορέσει να μετρήσει την ισχύ που αναπτύσσει ο οργανισμός του κατά το ανέβασμα μιας σκάλας;

4.33. Βρείτε τις σωστές αντιστοιχίσεις αριθμών και γραμμάτων.
1. Είναι ίση με την ανά μονάδα χρόνου μεταβιβαζόμενη ενέργεια.
α) Κινητική ενέργεια

2. Επινόησε μια εντυπωσιακή βελτίωση της ατμομηχανής
β) Μοχλός

3. Μας επιτρέπει να αυξάνουμε την τιμή μιας δύναμης
γ) Έργο μια δύναμης

4. Ένα τζάουλ ανά δευτερόλεπτο
δ) James Watt

5. Είναι ίση με το ένα δεύτερο της μάζας του σώματος επί το τετράγωνο της ταχύτητάς του.
ε) Δυναμική ενέργεια

6. Καθώς πέφτει ένα σώμα η τιμή της ελαττώνεται

στ) Ισχύς

7. Υπό ορισμένες προϋποθέσεις είναι γινόμενο της δύναμης επί τη μετατόπιση.

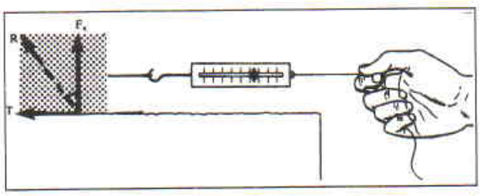
ζ) Ένα βατ.



Να λύσουμε προβλήματα

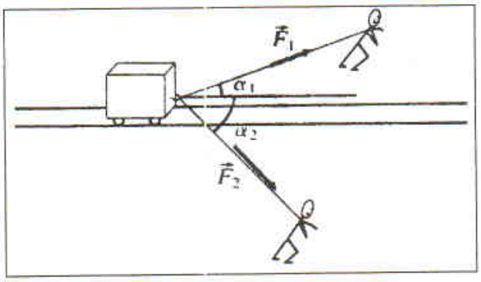
4.34. Ένας άνθρωπος μετακινεί κάποιο αντικείμενο κατά 2 μέτρα ασκώντας του δύναμη κατά την κατεύθυνση της μετατόπισης. Σας ζητούμε να υπολογίσετε την τιμή της δύναμης βασιζόμενοι στο γεγονός ότι κατά τη μετακίνηση αυτή ο άνθρωπος μεταβιβάζει στο αντικείμενο ενέργεια 7 τζάουλ. Να θεωρήσετε ότι δεν ασκείται άλλη δύναμη στο αντικείμενο.

4.35. Ένα αντικείμενο 150 γραμμαρίων προσδένεται στο άκρο δυναμόμετρου και μετατοπίζεται πάνω σε οριζόντια επιφάνεια κατά 20 εκατοστά.
Κατά τη διάρκεια της μετακίνησης του το δυναμόμετρο δείχνει σταθερά 0,3 N. Σας ζητούμε να υπολογίσετε



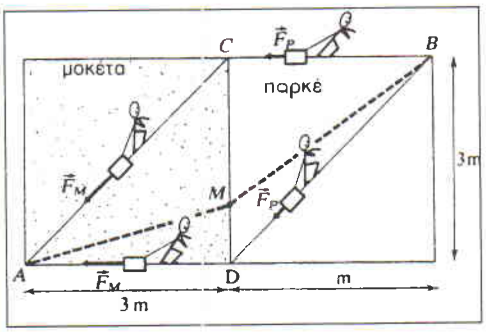
α) το έργο της δύναμης που ασκεί το τεντωμένο νήμα στο αντικείμενο
β) την ενέργεια που μεταβιβάστηκε στο αντικείμενο
γ) την επιτάχυνση του αντικειμένου.
Να θεωρήσετε την τριβή αμελητέα.

4.36. Δύο άνθρωποι τραβάνε το βαγονάκι, το οποίο μετακινείται πάνω σε ράγες οριζόντιες.



α) Υπολογίστε το ολικό έργο που εκτελείται από τις οριζόντιες δυνάμεις $F_1 = 200$ N και $F_2 = 300$ N σε μετατόπιση 50 m.
β) Προσδιορίστε το μέτρο μιας άλλης δύναμης, η οποία θα εκτελούσε το ίδιο έργο ασκούμενη οριζόντια υπό γωνία 45° σε σχέση με την προηγούμενη μετατόπιση. Δίνονται οι τιμές των γωνιών $\alpha_1 = 30°$ και $\alpha_2 = 60°$.

4.37. Θέλετε να μεταφέρετε ένα έπιπλο από τη μια γωνία (A) του δωματίου στην άλλη (B).



α) Ποιο δρόμο σας συμφέρει να ακολουθήσετε τον A C B ή τον A D B;
β) Χρησιμοποιήσετε τα στοιχεία που αναγράφονται στο σχήμα για να υπολογίσετε το έργο της τριβής κατά τις μετακινήσεις A C B και A D B;
Κατά την ολίσθηση στη μοκέτα η δύναμη τριβής είναι $T_1 = 200$ N, ενώ στο παρκέ

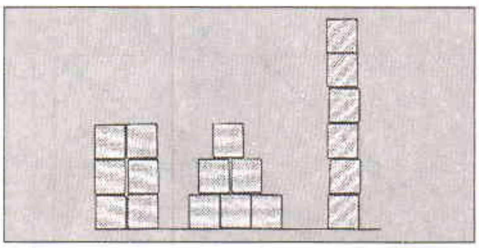
T_2 = 70 N.

4.38. Πόση ενέργεια πρέπει να μεταβιβάσουμε σε μια πέτρα 200 γραμμαρίων για να της προσδώσουμε ταχύτητα
α) 4 m/s β) 8 m/s γ) 20 m/s

4.39. Πόση ενέργεια πρέπει να μεταβιβάσουμε σε μια πέτρα 300 γραμμαρίων ώστε να την εκσφενδονίσουμε οριζόντια από ύψος 1,25 m και να φθάσει σε οριζόντια απόσταση
α) 2 m β) 20 m;

4.40. Η καρδιά δίνει 1 Joule σε κάθε χτύπο. Εκτιμήστε το ολικό έργο που δίνει μια καρδιά σε μια ζωή. Ο Όλυμπος έχει ύψος 2918 μέτρα. Υπολογίστε τη μάζα του σώματος που πρέπει να ανυψώσετε από την επιφάνεια της θάλασσας στην κορυφή του Ολύμπου, ώστε να προκαλέσετε αύξηση δυναμικής ενέργειας ίση με την ενέργεια που μεταβιβάζεται από την καρδιά σε μια ζωή.

4.41. Με έξι συμπαγείς κύβους ένα παιδί έφτιαξε όλες αυτές τις κατασκευές.
Κάθε κύβος έχει όγκο 64 cm^3 και μάζα 400 g.



Σας ζητούμε να υπολογίσετε τη δυναμική ενέργεια (ως προς το έδαφος) κάθε κατασκευής.

4.42. Εκτοξεύουμε προς τα πάνω μια πέτρα μάζας 120 γραμμαρίων. Πόση ενέργεια πρέπει να της μεταβιβάσουμε για να φθάσει α) σε ύψος 2 m β) σε ύψος 10 m;

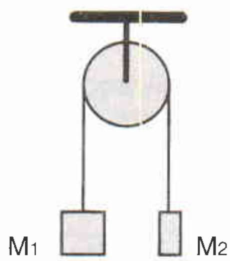
4.43. Ένα μολύβδινο σώμα με μάζα 4 kg αφήνεται από ύψος 45 m πάνω από το έδαφος. Οι τιμές της κατακόρυφης μετατόπισής του κατά τις αντίστοιχες χρονικές στιγμές δίνονται από τον παρακάτω πίνακα.

Χρόνος (s)	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3
Μετατόπιση (m)	0	1,25	5	11,25	20	31,25	45

Φτιάξτε έναν πίνακα με επτά στήλες και έξι σειρές. Βάλτε στις δύο πρώτες στήλες τις τιμές του χρόνου και της μετατόπισης. Υπολογίστε στη συνέχεια τις παρακάτω ποσότητες και γεμίστε τις υπόλοιπες στήλες με τα αποτελέσματα. Κάθε μια απ' αυτές αναφέρεται στο μολύβδινο σώμα και στις αντίστοιχες χρονικές στιγμές.
α) Το ύψος πάνω από το έδαφος. β) Τη βαρυτική δυναμική ενέργεια ως προς το έδαφος. γ) Το μέτρο της ταχύτητας. δ) Την κινητική ενέργεια. ε) Τη μηχανική ενέργεια.

4.44. Βρισκόμαστε σε ένα μπαλκόνι σε ύψος 8 m από το δρόμο και εκσφενδονίζουμε ένα αντικείμενο πλάγια προς τα πάνω με 4 m/s. Με πόση ταχύτητα φθάνει στο έδαφος;

4.45. Το βαρίδι M_1 έχει μάζα 100 g και έχει προσδεθεί στο άκρο ενός νήματος. Το νήμα περνάει από ακίνητη τροχαλία και στο άλλο άκρο του προσδένεται το βαρίδι M_2 μάζας 200 g έτσι ώστε τα δύο τμήματα του νήματος να είναι κατακόρυφα.

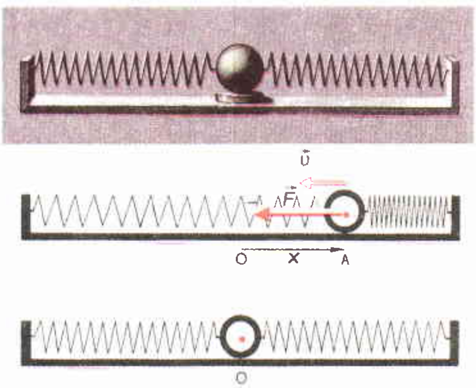


Συγκρατούμε τα δύο βαρίδια ώστε να είναι ακίνητα και να βρίσκονται –στα άκρα του τεντωμένου νήματος– και τα δύο σε ύψος 50 cm από το έδαφος. Τα αφήνουμε στη συνέχεια ελεύθερα οπότε το M_2 κινείται προς το έδαφος ενώ το M_1 ανέρχεται. Σας ζητούμε να προβλέψετε την ταχύτητα του καθενός κατά τη στιγμή που απέχουν υψομετρικά κατά 80 cm. Να θεωρήσετε την τριβή αμελητέα.

4.46. Ένα κουτί 400 g αφήνεται στην κορυφή κεκλιμένου επιπέδου σε ύψος 50 cm από το έδαφος και ολισθαίνει μέχρι που φθάνει στο έδαφος. Σας ζητούμε, θεωρώντας την τριβή αμελητέα, να υπολογίσετε
α) το έργο καθεμιάς από τις δυνάμεις που ασκούνται στο αντικείμενο
β) τη μεταβολή της δυναμικής ενέργειας και τη μεταβολή της κινητικής ενέργειας κατά τη μετακίνηση αυτή.

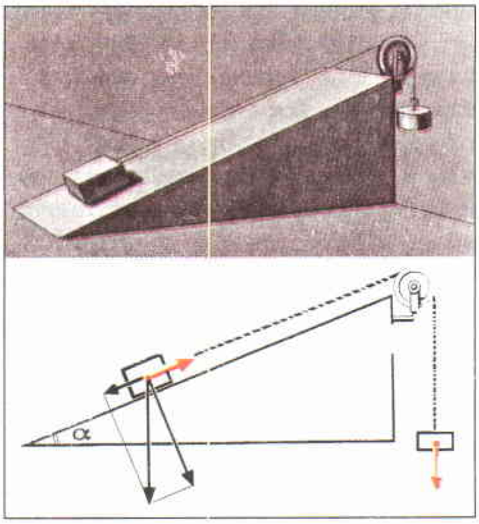
4.47. Η μικρή σφαίρα συνδέεται με δύο όμοια ελατήρια και εκτελεί ταλαντώσεις σε οριζόντια επιφάνεια με τριβές ασήμαντες. Δίνονται οι παρακάτω πληροφορίες.

Θέση	x(cm)	υ(m/s)	U(J)	K(J)	E_{μ}(J)
1	27,0	0	0,091	0	0,091
2	25,9	0,26	0,084	0,007	0,091
3	22,8	0,50	0,065	0,025	0,090
4	17,8	0,70	0,040	0,049	0,089

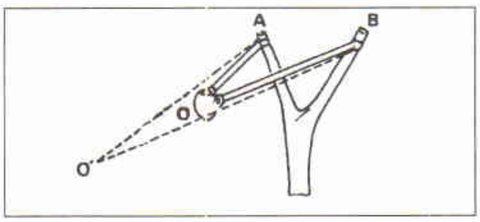


Ζητείται α) η μάζα της σφαίρας β) η σταθερά κάθε ελατηρίου γ) η μέγιστη ταχύτητα της σφαίρας. Τι συμπεράσματα βγάζετε για την εξέλιξη της ολικής ενέργειας του συστήματος;

4.48. Το κυλινδρικό σώμα $Σ_1$ έχει μάζα 200 g ενώ το $Σ_2$ 360 g. Αρχικά συγκρατούμε το σύστημα και σε κάποια στιγμή το αφήνουμε. Ποια θα είναι η ταχύτητα κάθε σώματος όταν το $Σ_1$ έχει μετακινηθεί κατά 10 cm; Η γωνία του κεκλιμένου επιπέδου είναι $α = 30^{\circ}$ (Τριβές αμελητέες).



4.49. Οι διαστάσεις του λάστιχου της σφεντόνας είναι σύμφωνα με το σχήμα ΑΟ = ΟΒ = 10 cm όταν το λάστιχο δεν είναι τεντωμένο. Η απόσταση των δύο άκρων της διχάλας είναι ΑΒ = 12 cm. Ένα μικρό χαλίκι μάζας 20 g στερεώνεται στο σημείο Ο.
Κρατώντας στερεά με το ένα χέρι τη διχάλα τεντώνουμε με το άλλο το λάστιχο μέχρι το σημείο Ο'.
Τώρα είναι ΑΟ' = Ο' Β = 25 cm. Η αύξηση της δυναμικής ενέργειας είναι ίση με $1/2\ kx^2$ όπου x = ΟΟ' και k μια σταθερά, η οποία για το λάστιχο είναι 80 N/m.
Αφήνουμε το λάστιχο. Με ποια ταχύτητα εκσφενδονίζεται το χαλίκι;



4.50. Παίρνουμε ένα κομμάτι σπάγκο 40 cm, στο ένα του άκρο προσδένουμε ένα βα-

ρίδι 100 g και το άλλο άκρο το συγκρατούμε με το χέρι μας. Δημιουργείται έτσι ένα νήμα της στάθμης. Προσδίδουμε στο βαρίδι οριζόντια ταχύτητα 5 cm/s κατά τρόπο ώστε να εκτελέσει κυκλική κίνηση σε κατακόρυφο επίπεδο. Σας ζητούμε, βασιζόμενοι στο νόμο διατήρησης της μηχανικής ενέργειας να αποδείξετε ότι η κίνηση αυτή δεν μπορεί να είναι ομαλή κυκλική. Σας ζητούμε επίσης να υπολογίσετε α) την ταχύτητα του αντικειμένου όταν περνάει από το ανώτερο σημείο της τροχιάς και β) τη δύναμη η οποία ασκείται στον τεντωμένο σπάγκο κατά τη στιγμή εκείνη. Η τριβή και η αντίσταση του αέρα θεωρούνται αμελητέες.

4.51. Δύο σώματα με ίσες μάζες συνδέονται με ένα ελατήριο και ακινητούν πάνω σε οριζόντιο λείο δάπεδο. Ασκώντας οριζόντιες αντίθετες δυνάμεις στο σύστημα, προκαλούμε συμπίεση του ελατηρίου κατά x = 2 cm και στη συνέχεια αφήνουμε ελεύθερα και τα δύο σώματα ταυτόχρονα. Υπολογίστε την ταχύτητα κάθε σώματος τη στιγμή που το ελατήριο θα ξαναβρεθεί στο φυσικό του μήκος. Δίνεται η σταθερά του ελατηρίου k = 9 N/m και η μάζα κάθε σώματος m = 40 g.

4.52. Μια μικρή χαλύβδινη σφαίρα συγκρούεται με μια άλλη μεταλλική σφαίρα ίσης ακτίνας, η οποία ήταν ακίνητη. Ποιος πρέπει να είναι ο λόγος των μαζών των δύο σφαιρών ώστε μετά την κρούση να κινηθούν με ταχύτητες ίσων μέτρων αλλά αντίθετης κατεύθυνσης; Θεωρήστε ότι κατά την κρούση η μηχανική ενέργεια του συστήματος δεν παρουσίασε καμιά μεταβολή. Δεχθείτε επίσης ότι η ορμή της κινούμενης σφαίρας, πριν από τη σύγκρουση, κατευθύνεται στο κέντρο της ακίνητης.

4.53. Εκσφενδονίζουμε προς τα πάνω μια μικρή μπαλίτσα 30 γραμμαρίων με ταχύτητα 6 cm/s και αυτή φθάνει σε ύψος 130 cm. Σας ζητούμε να υπολογίσετε α) πόση ενέργεια μεταβιβάσαμε στη μπαλίτσα και β) πόσο ελαττώθηκε η μηχανική ενέργεια κατά την ανοδική της κίνηση, λόγω της αντίστασης του αέρα.

4.54. Όταν ο ακροβάτης πέφτει από ύψος 1 m το δίχτυ του τσίρκου βουλιάζει κατά 50 cm. Ποιο είναι το ελάχιστο ύψος –από το έδαφος– στο οποίο πρέπει να τεντωθεί οριζόντια το δίχτυ, ώστε οι ακροβάτες να μπορούν να πέφτουν από ύψος 16 m χωρίς κίνδυνο;

4.55. Ο Βασίλι Αλεξέγιεφ υπήρξε για πολλά χρόνια παγκόσμιος πρωταθλητής στην άρση βαρών. Μπορείτε να υπολογίσετε τη (μέση) ισχύ που ανέπτυξε σε μια του προσπάθεια κατά την οποία σήκωσε 254 kg σε 1,20 m μέσα σε 1,5 s;

4.56. Ένα αυτοκίνητο 1.200 kg «πιάνει» τα 72 km/h μέσα σε 6 δευτερόλεπτα.
Αγνοώντας την αντίσταση του αέρα υπολογίστε την ισχύ που απαιτήθηκε.

Ντοκουμέντο

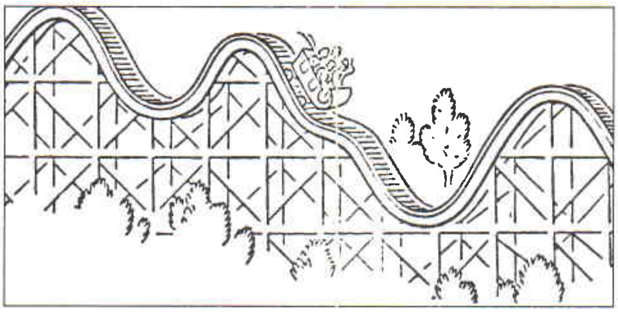
Από το βιβλίο

Η εξέλιξη των ιδεών στη Φυσική

των A. Einstein - L. Infeld.

Τα βαγονάκια

Ας θεωρήσουμε την κίνηση του λαϊκού παιχνιδιού που δημιουργεί φρικίαση και που το ονομάζουν «βαγονάκια». Ένα μικρό βαγονάκι ανεβάζεται ή σπρώχνεται στο ψηλότερο σημείο της τροχιάς. Όταν αφήνεται ελεύθερο, αρχίζει με την επίδραση του βάρους του να κυλά προς τα κάτω, ύστερα ανεβαίνει και κατεβαίνει κατά μήκος μιας γραμμής φανταστικά καμπύλης, προκαλώντας σ' αυτούς που είναι μέσα ένα ρίγος με τις απότομες αλλαγές της ταχύτητας. Το πιο ψηλό σημείο είναι εκείνο από το οποίο ξεκινά το βαγονάκι και το ύψος αυτό δεν θα το ξαναφτάσει στην πορεία του. Μια πλήρης περιγραφή της κίνησης θα ήταν πολύ περίπλοκη. Υπάρχει, από τη μία· η μηχανική πλευρά του προβλήματος, οι αλλαγές ταχύτητας και θέσης μέσα στο χρόνο, κι από την άλλη η τριβή και κατά συνέπεια η αύξηση της θερμοκρασίας στις ράγες και στους τροχούς. Ο μόνος σημαντικός λόγος για τη διαίρεση του φυσικού φαινομένου σ' αυτές τις δυο όψεις, είναι να κάνουμε δυνατή τη χρήση εννοιών που συζητήθηκαν προηγούμενα. Η διαίρεση οδηγεί σ' ένα ιδεατό πείραμα, επειδή ένα φυσικό φαινόμενο όπου θα εμφανιζότανε μονάχα η μηχανική όψη, μπορούμε να το φανταστούμε, όχι όμως και να το πραγματοποιήσουμε



Για το ιδεατό πείραμα μπορούμε να φανταστούμε πως κάποιος κατάφερε να περιορίσει ολοκληρωτικά την τριβή που συνοδεύει πάντα την κίνηση. Παίρνει λοιπόν την απόφαση να εφαρμόσει την ανακάλυψή του στην περίπτωσή μας, και πρέπει να βρει μόνος του τον τρόπο για να την πραγματοποιήσει... Ας παρακολουθήσουμε την κίνηση του ιδεατού βαγονιού πάνω στις ιδεατές ράγες, ξεκινώντας απο τη στιγμή που αρχίζει να κατεβαίνει από την αφετηρία. Όσο κινείται, η απόστασή του από το έδαφος μικραίνει, αλλά η ταχύτητά του μεγαλώνει. Η φράση αυτή μπορεί, από πρώτη ματιά, να μας ξαναφέρει στο μυαλό τη φράση από το μάθημα ξένης γλώσσας: «Δεν έχω μολύβι, αλλά έχετε έξι πορτοκάλια». Ετούτη όμως δεν είναι τόσο κουτή. Ανάμεσα στο γεγονός πως δεν έχω μολύβι και στο ότι εσείς έχετε έξι πορτοκάλια, δεν υπάρχει καμιά σχέση, αλλά υπάρχει μια πολύ πραγματική εξάρτηση ανάμεσα στην απόσταση του βαγονιού από το έδαφος και την ταχύτητά του. Μπορούμε να υπολογίσουμε την ταχύτητα του βαγονιού σ' οποιαδήποτε στιγμή, αν ξέρουμε σε τι ύψος βρίσκεται πάνω από το έδαφος. Παραλείπουμε όμως εδώ αυτό το σημείο εξαιτίας του ποσοτικού χαρακτήρα του, που εκφράζεται καλύτερα με μαθηματικούς τύπους.

Στο ανώτερο σημείο, η ταχύτητα του βαγονιού είναι μηδέν και το βαγόνι βρίσκεται 30 μέτρα πάνω από το έδαφος. Όταν βρίσκεται στο χαμηλότερο σημείο, δεν το χωρίζει καμιά απόσταση από το έδαφος και η ταχύτητά του φτάνει στη μέγιστη τιμή. Τα δεδομένα αυτά μπορούν να εκφραστούν με άλλους όρους: Στο ψηλότερο σημείο το βαγονάκι έχει ***δυναμική ενέργεια,*** *αλλά όχι και* ***κινητική ενέργεια*** *ή ενέργεια κίνησης. Στο χαμηλότερο σημείο έχει τη μεγαλύτερη κινητική ενέργεια, αλλά όχι και δυναμική. Σ' όλα τα ενδιάμεσα σημεία, όπου έχει μια ορισμένη ταχύτητα και βρίσκεται σ' ένα ορισμένο ύψος, έχει ταυτόχρονα και κινητική και δυναμική ενέργεια. Η δυναμική ενέργεια αυξάνει με το ύψος, ενώ η κινητική μεγαλώνει, όσο αυξάνει η ταχύτητα. Οι αρχές της μηχανικής αρκούν να εξηγήσουν την κίνηση. Στη μαθηματική περιγραφή έχουμε δύο εκφράσεις για την ενέργεια. Καθεμιά τους μεταβάλλεται αλλά το άθροισμά τους παραμένει σταθερό. Είναι λοιπόν δυνατόν να ορίσουμε μαθηματικά και αυστηρά τις έννοιες της δυναμικής ενέργειας που εξαρτάται από τη θέση, και της κινητικής ενέργειας που εξαρτάται από την ταχύτητα. Η εισαγωγή αυτών των δύο όρων είναι βεβαίως αυθαίρετη και δεν δικαιολογείται παρά από λόγους διευκόλυνσης. Το άθροισμα των δυο ποσοτήτων μένει σταθερό και ονομάζεται σταθερά της κίνησης. Η ολική ενέργεια, κινητική και δυναμική, μπορεί να συγκριθεί με ένα υλικό, ας πούμε με χρήμα, που μένει αμετάβλητο σε ποσότητα, αλλά που μπορεί συνεχώς να μετατρέπεται από ένα είδος νομίσματος σ' άλλο, από δολλάρια, ας πούμε, σε λίρες και αντίστροφα, σύμφωνα με καθορισμένη ανταλλακτική σχέση.*

Στα πραγματικά βαγονάκια, όπου οι τριβές εμποδίζουν το βαγονάκι να ξαναφτάσει το ύψος από το οποίο ξεκίνησε, υπάρχει πάντα μια συνεχής εναλλαγή ανάμεσα στην κινητική και τη δυναμική ενέργεια. Εδώ όμως το άθροισμα δεν παραμένει σταθερό, αλλά μειώνεται. Τώρα χρειάζεται ένα ακόμα σπουδαίο και θαρραλέο βήμα, για να συνδέσουμε μεταξύ τους τη μηχανική και θερμική πλευρά της κίνησης. Ο πλούτος των συνεπειών και των γενικεύσεων που προκύπτουν απ' αυτό το βήμα, θα φανεί αργότερα.

Στην κίνηση μπλέκεται τώρα κάτι περισσότερο από την κινητική και τη δυναμική ενέργεια: η θερμική ενέργεια. Αντιστοιχεί στην ελάττωση της μηχανικής ενέργειας, δηλαδή της κινητικής και της δυναμικής ενέργειας; Δεν θ' αργήσει να φανεί μια νέα υπόθεση. Αν μπορεί να θεωρηθεί σαν μορφή ενέργειας, τότε ίσως το άθροισμα των τριών ενεργειών θερμικής, δυναμικής και κινητικής, παραμένει σταθερό.

Η ενέργεια διατηρείται και υποβαθμίζεται



Η θερμοκρασία • Από τον Γαλιλαίο στον Κέλσιο • Η κλίμακα Kelvin • Θερμική ισορροπία • **Θερμότητα και θερμοκρασία** • Η θεμελιώδης εξίσωση της θερμιδομετρίας • Ειδική θερμοτητα • Μια θερμότητα λανθάνουσα • **Η θερμότητα είναι μεταβιβαζόμενη ενέργεια** • **Η αρχή της διατήρησης της ενέργειας** • **Ο πρώτος νόμος της θερμοδυναμικής** • Οι δύο μηχανισμοί ανταλλαγής ενέργειας • Ενέργεια εσωτερική • **Ενέργεια και μικρόκοσμος** • Άτομα και μόρια • Εσωτερική ενέργεια και μικρόκοσμος • Κινητική θεωρία των αερίων • **Ο δεύτερος νόμος της θερμοδυναμικής** • Από τη σκοπιά του μακρόκοσμου • Η ενέργεια υποβαθμίζεται • Από τη σκοπιά του μικρόκοσμου • Εντροπία • **Το φαινόμενο ζωή** • **Χημική ενέργεια** • **Ηλιακή ακτινοβολία** • **Να θυμηθούμε** • **Να αναρωτηθούμε** • **Να λύσουμε προβλήματα** • **Ντοκουμέντο.**

Η θερμοκρασία

ο θάλαμος βράδιαζε
σαν τον υδράργυρο που χαμηλώνει
με το πρώτο φθινόπωρο
Νίκος-Αλέξης Ασλάνογλου



Η επαφή με το θερμό ή το ψυχρό σώμα μάς δημιουργεί το γνωστό αίσθημα. Το αίσθημα είναι υποκειμενικό. Στον ίδιο χώρο ένας κρυώνει, ένας άλλος ζεσταίνεται. Φανταστείτε πόσο σοβαρή θα είναι η διαφωνία ανάμεσα σ' έναν Εσκιμώο κι έναν Κενυάτη αν βρεθούν ένα μεσημεράκι σε πλατεία της Λάρισας και θελήσουν να μιλήσουν για τις κλιματικές συνθήκες εκείνου του μεσημεριού.

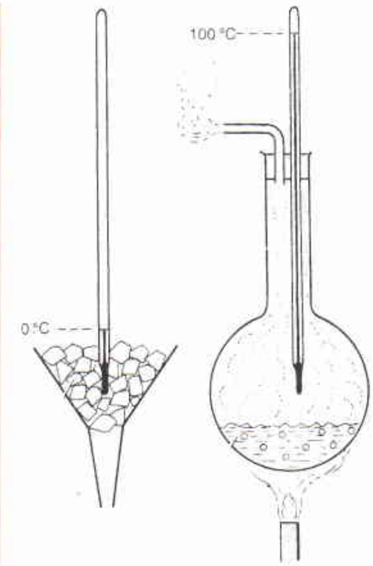
Η θερμοκρασία είναι το μέγεθος που επινόησαν οι άνθρωποι για να μπορούν να «βαθμολογούν» αντικειμενικά την αιτία που προκαλεί αυτό το αίσθημα. Σε δεδομένη στιγμή αποδίδουμε, λοιπόν, σε κάθε σώμα μια τιμή θερμοκρασίας σε τρόπο ώστε η τιμή αυτή να είναι κοινή για όσα σώματα βρίσκονται στην ίδια κατάσταση.

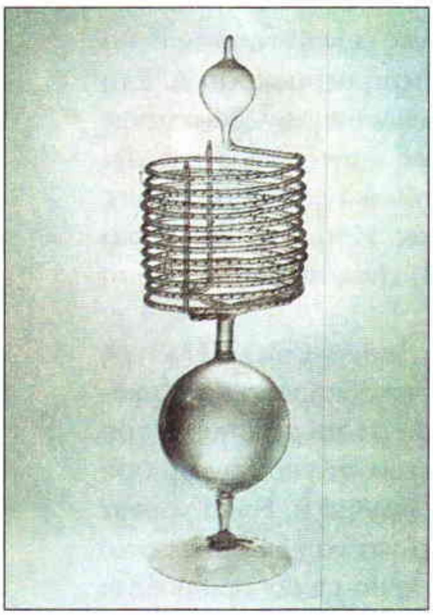


Για να το κατανοήσουμε καλό θα είναι να θέσουμε το πρόβλημα σε δύο βαθμίδες. Στην πρώτη αναρωτιόμαστε *πώς* θα συγκρίνουμε τις θερμοκρασιακές μεταβολές. Ο προβληματισμός θα μας οδηγήσει στην κατασκευή του θερμοσκόπιου. Στο δεύτερο παρακολουθούμε τη διαδικασία δημιουργίας μιας θερμοκρασιακής κλίμακας, με βάση την οποία θα μπορούμε να αποδίδουμε σε κάθε θερμική κατάσταση έναν ορισμένο αριθμό. Αν εφοδιάσουμε το θερμοσκόπιο με την κλίμακα, θα έχουμε πια ένα θερμόμετρο.

Από τον Γαλιλαίο στον Κέλσιο

Σε μια εποχή σαν τη δική μας, που είμαστε εξοικειωμένοι να ακούμε τον εκφωνητή του μετεωρολογικού δελτίου να μιλάει





Θερμοσκόπιο του 17ου αιώνα. Μουσείο των επιστημών. Φλωρεντία

για τη ζέστη και το κρύο με αριθμούς, είναι ί-σως δύσκολο να φανταστούμε ότι πριν από 300 χρόνια δεν είχε βρεθεί ένας άνθρωπος, να επινοήσει κάποιο τρόπο για τη μέτρηση των θερμοκρασιών. Κανείς δεν μπορούσε να καθορίσει «πόσο» ζεστότερη ήταν μια μέρα από την προηγούμενη.

Οι πρώτες προσπάθειες για να προσδιοριστεί η διαβάθμιση ανάμεσα στο κρύο και το ζεστό άρχισαν κατά τα τέλη του 16ου αιώνα και έδωσαν τα **θερμοσκόπια.** Ήταν τα πρώτα όργανα με τα οποία έγινε η σύγκριση ανάμεσα στο κρύο και το ζεστό χωρίς την παρεμβολή ανθρώπινου αισθήματος. Το πρώτο θερμοσκόπιο βασιζόταν στη διαστολή του αέρα. Πρέπει να επινοήθηκε και να κατασκευάστηκε από το Γαλιλαίο στα 1593, την εποχή που η μελέτη της φύσης έχει αρχίσει να εγκαταλείπει την τροχιά της ποιοτικής περιγραφής και να εισέρχεται και στην περιοχή των ποσοτήτων και των αριθμών. Τον επόμενο αιώνα κατασκευάζονται όργανα που βασίζονται στη διαστολή των υγρών. Αρχικά χρησιμοποιείται το νερό, αργότερα κρασί,

χρωματισμένο οινόπνευμα και πολύ σπάνια λάδι. Η σκέψη να χρησιμοποιηθεί υδράργυρος υλοποιήθηκε μόνο το 1721 από το Γερμανό Daniel Fahrenheit (Ντάνιελ Φαρενάιτ, 1686-1736), που έδωσε και τα πρώτα **θερμόμετρα** με τη σύγχρονη έννοια.

Στο μεταξύ η ιδέα να αποδίδεται το θερμό και το κρύο με αριθμούς έδωσε τις πρώτες βαθμολογήσεις, που αρχικά υπήρξαν εντελώς αυθαίρετες. Μόλις στα 1694 ο Renaldini θα προτείνει η βαθμολόγηση να στηρίζεται σε **δύο σταθερά σημεία-θερμοκρασίες,** σε δύο δηλαδή αριθμούς από τους οποίους ο πρώτος να αντιστοιχεί στη σταθερή –όπως πίστευε– θερμοκρασία στην οποία εκδηλώνεται το φαινόμενο της τήξης του πάγου και ο δεύτερος στη θερμοκρασία –σταθερή κι αυτή όπως πίστευε– που βράζει το νερό. Τα δύο αυτά σημεία θα δημιουργούσαν από κει και πέρα κάποια κλίμακα.

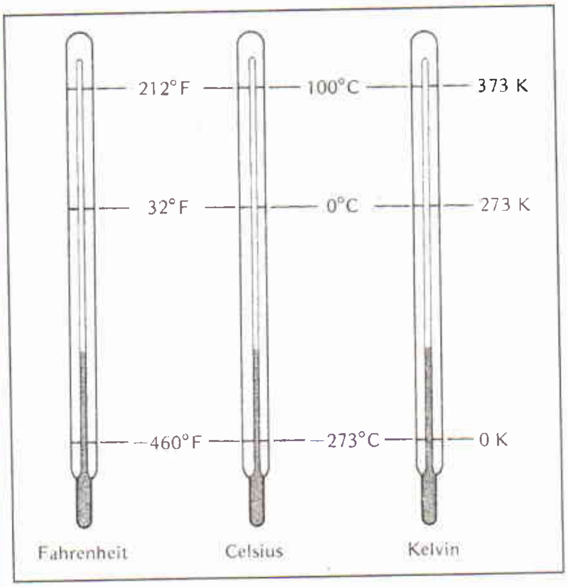
Οι περισσότεροι όμως, επιστήμονες αρνιόντουσαν ότι ο βρασμός του νερού γινόταν σε σταθερή θερμοκρασία. Στη διάρκεια των πενήντα χρόνων που ακολούθησαν, δεν έπαψε να αναζητείται κάποια κλίμακα εύκολη και εξυπηρετική. Δεκάδες θερμοκρασιακές κλίμακες προτάθηκαν, από τις οποίες δύο επέζησαν μέχρι και την εποχή μας. Η πρώτη, η κλίμακα που πρότεινε ο Fahrenheit στα 1714, είναι ακόμα σε χρήση στις ΗΠΑ.

Στα 1741, ο Σουηδός αστρονόμος Anders Celsius (Άντερς Κέλσιους, 1701-1744) είχε την ιδέα να υποδιαιρέσει το θερμοκρασιακό διάστημα ανάμεσα στα δύο σταθερά σημεία του Renaldini, σημειώνοντας στην τήξη του πάγου τον αριθμό 100 και στον βρασμό του νερού τον αριθμό 0. Εννιά χρόνια αργότερα η πρόταση θα αναστραφεί για να εδραιωθεί από τότε η λογική *ζεστό-μεγάλοι αριθμοί, κρύο-μικροί αριθμοί* και να φτάσουμε στις σημερινές εκφράσεις «το θερμόμετρο έπεσε» ή «το ψύχος είναι κάτω από το μηδέν».

Από την εποχή που υποστηρίχτηκε από τη Γαλλική Εθνοσυνέλευση το δεκαδικό σύστημα σαν καταλληλότερο για τις μετρήσεις, η εκατοντοβάθμια κλίμακα Κελσίου άρχισε να επικρατεί.

Η κλίμακα Κελσίου

Για να ορίσουμε με ακρίβεια τα σημεία 0 και 100 της Κελσιακής κλίμακας, πρέπει να πάρουμε υπ' όψη μας ότι το σημείο τήξης και το σημείο βρασμού επηρεάζονται από την εξωτερική πίεση. Λέμε, λοιπόν ότι ως *θερμοκρασία 0, ορίζεται η θερμοκρασία τήξης του πάγου σε πίεση μιας ατμόσφαιρας* και αντίστοιχα *το σημείο 100 ορίζεται ως η θερμοκρασία, στην οποία βράζει το νερό, σε πίεση μιας ατμόσφαιρας*. Καθεμιά από τις 100 μονάδες, στις οποίες υποδιαιρείται το μεταξύ τους διάστημα, αποτελεί τη θερμοκρασιακή μονάδα που λέγεται *ένας βαθμός Κελσίου* και συμβολίζεται με 1 °C.



Η απόλυτη κλίμακα Kelvin

Το 19ο αιώνα, όταν πια οι απόψεις για τη θερμοκρασία είχαν ακολουθήσει την εξέλιξη της θερμοδυναμικής, ο λόρδος Kelvin (1824-1904) πρότεινε τη λεγόμενη *απόλυτη κλίμακα θερμοκρασιών*, η οποία έβρισκε θεωρητική δικαίωση από τη θερμοδυναμική. Είναι μια κλίμακα λιγότερο αυθαίρετη από τις προηγούμενες γιατί δεν βασίζεται σε αυθαίρετα επιλεγμένη ιδιότητα ούτε σε ένα ορισμένο θερμομετρικό σώμα, αλλά σε έ-

να γενικό νόμο της φυσικής.

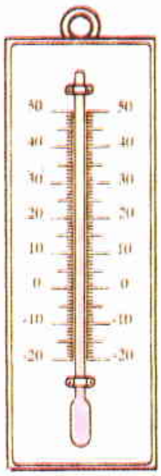
Εδώ ως σημείο μηδέν (απόλυτο μηδέν) προτείνεται η κατώτερη οριακή θερμοκρασία, η οποία –σύμφωνα με τη θερμοδυναμική– μπορεί να υπάρξει μέσα στη φύση.

Αν συμβολίσουμε με Τ και θ τις ενδείξεις των δυο κλιμάκων Kelvin και Κελσίου που αντιστοιχούν στην ίδια θερμοκρασία θα ισχύει $T = 273,15 + \theta$. Θα θεωρούμε κατά προσέγγιση $T = 273 + \theta$.

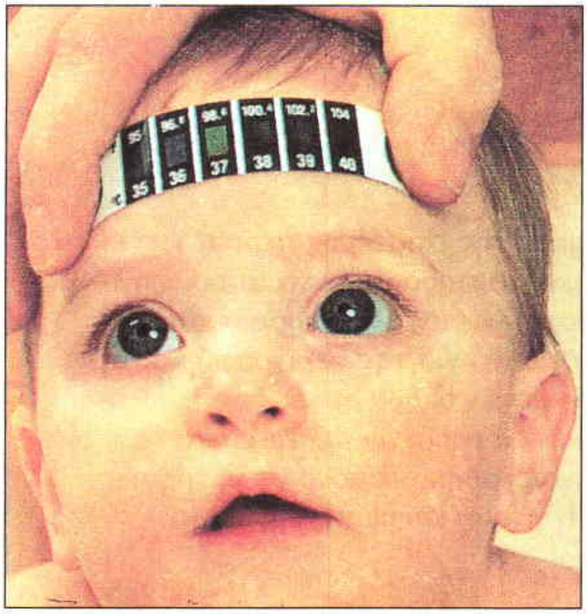
Για τις θερμοκρασιακές μεταβολές ισχύει $\Delta T = \Delta\theta$.

Θερμική ισορροπία

Αυτό που «δείχνει» ένα θερμόμετρο είναι η θερμοκρασία «του». Μπορεί όμως να μετράει και τη θερμοκρασία άλλων σωμάτων. Η θερμομέτρηση βασίζεται στην εύλογη παραδοχή ότι *εφόσον δύο σώματα έλθουν σε επαφή θα αποκτήσουν κοινή θερμοκρασία*. Κι αυτό γιατί, στο μέτρο που μπορούμε να εμπιστευτούμε την αφή μας, όλα τα αντικείμενα γίνονται εξ ίσου ζεστά εφόσον διατηρηθούν σ' επαφή για ορισμένο χρονικό διάστημα. Αν φανταστούμε, λοιπόν, το θερμόμετρό μας να έρχεται σε επαφή με κάποιο σώμα, η θερμοκρασία που θα διαβάσουμε, θα είναι θερμοκρασία *και* του θερμομέτρου *και* του σώματος.



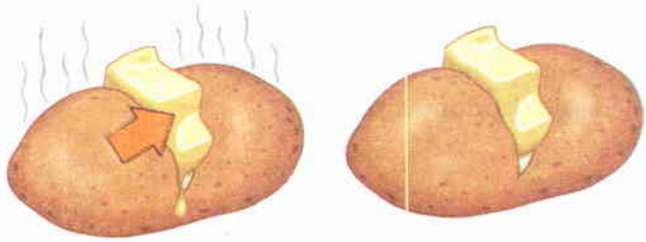
Στα θερμόμετρα που βασίζονται στη διαστολή των υγρών χρησιμοποιείται συνήθως υδράργυρος επειδή παρουσιάζει πολλά πλεονεκτήματα, σε σχέση με άλλα υγρά. Είναι πολύ καλός αγωγός της θερμότητας, εμφανίζει σημαντική διαστολή, δεν διαβρέχει το γυαλί, φαίνεται εύκολα και ακόμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για σχετικά μεγάλη περιοχή θερμοκρασιών, δεδομένου ότι έχει χαμηλό σημείο πήξεως (–38,8°C) και ψηλό σημείο βρασμού (357°C).



Χρησιμοποιούμε την έννοια *θερμική ισορροπία* για δύο σώματα που βρίσκονται σε θερμική επαφή χωρίς να εκδηλώνεται καμία αλλαγή στη θερμοκρασία του. Η ισότητα δύο θερμοκρασιών διαπιστώνεται με το θερμόμετρο. Αυτό όμως κρύβει μία παραδοχή, που όσο και να φαίνεται εύλογη, δεν είναι αυτονόητη. Ότι δηλαδή όταν δύο ή περισσότερα σώματα βρίσκονται σε θερμική ισορροπία με σώμα Θ (για παράδειγμα ένα θερμόμετρο) θα βρίσκονται σε θερμική ισορροπία και μεταξύ τους. Η πρόταση αυτή είναι καταστάλαγμα της καθημερινής πείρας και συχνά αναφέρεται ως *μηδενικός νόμος της θερμοδυναμικής*.

Θερμοκρασία και θερμότητα

Είναι αλήθεια ότι στην πορεία της επιστήμης πέρασε ένα εντυπωσιακά μεγάλο χρονικό διάστημα μέχρι να αποσαφηνιστεί η διάκριση ανάμεσα στις έννοιες θερμοκρασία και θερμότητα. Είναι επίσης αλήθεια ότι για την περιγραφή και τη μελέτη των θερμικών φαινομένων οι δυο αυτές έννοιες είναι και αναγκαίες και απ' ότι φαίνεται μέχρι σήμερα αναντικατάστατες. Μέχρις εδώ αναφερθήκαμε μόνο σε μετρήσεις θερμοκρασιών. Να δούμε τι γίνεται και με τη θερμότητα.



Προς το παρόν ας αρκεστούμε στο ότι **θερμότητα είναι «αυτό» που μεταβιβάζεται από ένα σώμα σ' ένα άλλο, εξ αιτίας της διαφοράς που παρουσιάζουν οι θερμοκρασίες τους.** Όσο για τις συνέπειες αυτής της αυθόρμητης μεταβίβασης (ροής) είναι η αύξηση στη θερμοκρασία του αρχικά ψυχρότερου σώματος και η ελάττωση στη θερμοκρασία του αρχικά θερμότερου. Τα πράγματα λοιπόν εξελίσσονται σαν από το θερμόμετρο σώμα να μεταβιβάζεται στο ψυχρότερο *κάτι,* που θα το λέμε θερμότητα.

Το ποιόν της θα μας απασχολήσει αργότερα. Θα επιχειρήσουμε προς το παρόν να τη μελετήσουμε ποσοτικά. Δεν είναι παράλογο να δεχτούμε ότι η θερμότητα που προσφέρει η φλόγα ενός λύχνου είναι ανάλογη προς τον χρόνο, εφόσον καταναλώνεται μια σταθερή ποσότητα καυσίμου στη μονάδα του χρόνου.

Οι γνωστές εμπειρίες μάς ενθαρρύνουν να υιοθετήσουμε μια τέτοια παραδοχή. Αν έχουμε λοιπόν μια πηγή σταθερής θερμικής παροχής θα μπορούμε να ανάγουμε τις μετρήσεις ποσών θερμοτητας σε μετρήσεις χρόνων. Για τα ποσά θερμότητας θα χρησιμοποιούμε το επικρατέστερο σύμβολο· είναι το **Q**.

Η θεμελιώδης εξίσωση της θερμιδομετρίας

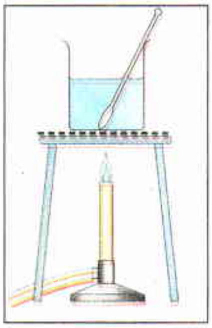
Το ερώτημα είναι: *Απο τι εξαρτάται η αύξηση της θερμοκρασίας ενός σώματος;*

Η καθημερινή εμπειρία μάς διδάσκει ότι

i) το νερό, καθώς περνά η ώρα, ζεσταίνεται όλο και περισσότερο κάθε φορά που το βάζουμε να ζεσταθεί στο μάτι της κουζίνας

ii) αν αυξήσουμε την ποσότητα του νερού θα χρειαστεί περισσότερος χρόνος για να το ζεστάνουμε

iii) ένα οποιοδήποτε μεταλλικό αντικείμενο ζεσταίνεται πιο εύκολα σε σχέση με νερό ίδιου βάρους.



Η πειραματική έρευνα

Η καθημερινή εμπειρία δεν είναι βέβαια, αρκετή για να οδηγηθούμε σε μια απάντηση με χαρακτήρα φυσικού νόμου. Είναι ωστόσο καθοδηγητική.

Μέσα από πειραματική έρευνα – παρόμοια με αυτήν που αναπτύσσεται στον *εργαστηριακό οδηγό*– καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι

Η αύξηση της θερμοκρασίας που παρατηρείται σ' ένα σώμα

α) είναι ανάλογη προς το ποσό θερμότητας που μεταβιβάζεται στο σώμα

β) *είναι αντιστρόφως ανάλογη προς τη μάζα (m) του σώματος.*

γ) *εξαρτάται από τη φύση του υλικού.*

Η τελευταία αυτή εξάρτηση περιγράφεται με έναν συντελεστή – μέγεθος, ο οποίος λέγεται *ειδική θερμότητα του υλι-*

κού και συμβολίζεται με το γράμμα c. Αποτελεί ένα χαρακτηριστικό μέγεθος του υλικού όταν το σώμα είναι σε στερεά ή υγρή κατάσταση.

Με τη χρήση των κατάλληλων συμβόλων όλα τα παραπάνω μπορούν να διατυπωθούν με τη λεγόμενη θεμελιώδη εξίσωση της θερμιδομετρίας $\Delta\theta = Q/mc$ ή

$$\mathbf{Q = mc\Delta\theta}$$

Σε παρόμοια συμπεράσματα καταλήγουμε και για την παρατηρούμενη ελάττωση θερμοκρασίας του σώματος σε περίπτωση που η θερμότητα μεταβιβάζεται *από* το σώμα προς το περιβάλλον.

$$\mathbf{Q = mc(\theta_{\tau\epsilon\lambda} - \theta_{\alpha\rho\chi})}$$

Εφόσον $\theta_{\tau\epsilon\lambda} > \theta_{\alpha\rho\chi}$ θα είναι και $Q>0$ ενώ αν $\theta_{\tau\epsilon\lambda} < \theta_{\alpha\rho\chi}$ θα είναι $Q<0$. Το σύμβολο δηλαδή Q αποτελεί μια ποσότητα θετική εφόσον παριστάνει θερμότητα απορροφούμενη. Αντίθετα, αν αναφέρεται σε θερμότητα που παραχωρείται από ένα σώμα, είναι μια ποσότητα αρνητική.

Αν βασιστούμε στη θεμελιώδη εξίσωση της θερμιδομετρίας μπορούμε να ορίσουμε και μια μονάδα μετρήσεως για τα ποσά θερμότητας. Η μια θερμίδα –calorie– είναι η μονάδα που για πολλά χρόνια υπήρξε η επικρατέστερη. Για τον ορισμό της χρησιμοποιήθηκε το νερό. 1 cal ονομάζεται το ποσό θερμότητας, που απαιτείται για να αυξηθεί η θερμοκρασία 1 γραμμαρίου νερού κατά 1 βαθμό Κελσίου*. Η μονάδα που προκύπτει για την ειδική θερμότητα είναι το 1 cal/g °C. Σήμερα που όλες οι μορφές ενέργειας μετριώνται με Joule, μονάδα για τα ποσά θερμότητας θεωρείται το 1 Joule, και για την ειδική θερμότητα το 1 J $kg^{-1}K^{-1}$.

Το γινόμενο της μάζας ενός σώματος επί την ειδική θερμότητα του υλικού λέγεται *θερμοχωρητικότητα* του σώματος και

---

* Η ειδική θερμότητα των σωμάτων δεν είναι σταθερή αλλά μεταβάλλεται με τη θερμοκρασία. Αυτό κάνει αναγκαίο να οριστεί η θερμίδα σε ορισμένη μικρή περιοχή θερμοκρασίας. Συγκεκριμένα από 14,5 °C ως 15,5 °C. Εμείς θα θεωρούμε ότι οι ειδικές θερμότητες είναι σταθερές.

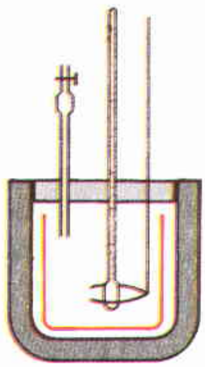
συμβολίζεται με το γράμμα κ. Η θεμελιώδης εξίσωση της θερμιδομετρίας μπορεί λοιπόν να γραφεί με την εξίσωση **Q = κΔθ**

Σε αντίθεση με την ειδική θερμότητα η οποία αναφέρεται σε κάποιο υλικό, η θερμοχωρητικότητα αναφέρεται σε ένα συγκεκριμένο σώμα και έχει ως μονάδα μετρήσεως το 1 JK^{-1}. Λέμε, για παράδειγμα, η ειδική θερμότητα του νερού, του χαλκού ή του πετρελαίου ενώ αντίθετα λέμε η θερμοχωρητικότητα 2 kg νερού ή η θερμοχωρητικότητα ενός ορισμένου δοχείου.

Ειδική θερμότητα

Έχουμε τώρα πια έναν τρόπο να μετράμε ποσά θερμότητας που ανταλλάσσονται ανάμεσα στα διάφορα σώματα. Μπορούμε ακόμα να μετράμε και τις ειδικές θερμότητες των υλικών, αν βασιστούμε στη λογική παραδοχή ότι σ' ένα θερμικά απομονωμένο σύστημα το ποσό θερμότητας που απορροφά το ψυχρότερο σώμα είναι κατά απόλυτη τιμή ίσο με το ποσό θερμότητας που παραχωρείται από το θερμότερο. Χρειαζόμαστε βέβαια μια διάταξη που να δημιουργεί προϋποθέσεις θερμικά απομονωμένου συστήματος, τέτοιου δηλαδή που δεν ανταλλάσσει θερμότητα με το περιβάλλον του. Τέτοια διάταξη είναι το **θερμιδόμετρο,** που αποτελείται από δοχείο με καλή θερμική μόνωση, κάτι σαν το γνωστό θερμός.





Ένα απλό θερμιδόμετρο νερού αποτελείται από δοχείο με νερό που τοποθετημένο μέσα σ' ένα μεγαλύτερο δοχείο, στηρίζεται πάνω σε βάσεις από φελλό. Το μεταξύ τους διάκενο,

το γεμίζουμε με κάποιο υλικό δυσθερμαγωγό. Ένα κομμάτι υαλοβάμβακα μπορεί να παίξει ικανοποιητικά το ρόλο αυτό. Ένα θερμόμετρο κι ένας αναδευτήρας συμπληρώνουν τη διάταξη.

Μπορούμε τώρα να μετρήσουμε την ειδική θερμότητα c_x του υλικού ενός σώματος, που δεν αντιδρά χημικά με το νερό. Εκτός από το θερμόμετρο είναι απαραίτητος κι ένας ζυγός. Ζυγίζουμε λοιπόν προκαταβολικά το νερό (m_1) και το σώμα (m_2). Θερμαίνουμε το σώμα σε κάποια γνωστή θερμοκρασία θ_2 και το βυθίζουμε στο νερό κλείνοντας καλά το θερμιδόμετρο. Αυτό που δείχνει –θ_1– αρχικά το θερμόμετρο, είναι η αρχική θερμοκρασία του, άρα και η αρχική θερμοκρασία του νερού. Αν αρχίσουμε να χρησιμοποιούμε τον αναδευτήρα, βλέπουμε το θερμόμετρο να «ανεβαίνει» μέχρι που θα φτάσει σε κάποια θερμοκρασία σταθερή ($\theta_{τελ}$), μήνυμα ότι έχει επέλθει θερμική ισορροπία. Σύμφωνα με την παραδοχή που αναφέραμε προηγουμένως και με βάση τον θεμελιώδη νόμο της θερμιδομετρίας θα ισχύει*:

$$|m_1 c_1(\theta_{τελ} - \theta_1)| = |m_2 c_x(\theta_{τελ} - \theta_2)| \text{ άρα } c_x = \frac{m_1}{m_2}\frac{\theta_{τελ} - \theta_1}{\theta_2 - \theta_{τελ}} c_1$$

Η σχέση μάς επιτρέπει να μετρήσουμε την ειδική θερμότητα του υλικού που χρησιμοποιήσαμε ξεκινώντας από την ειδική θερμότητα –C_1– του νερού, η οποία είναι εξ ορισμού 1 cal/g °C. Το 1 cal ισοδυναμεί, όπως θα δούμε παρακάτω, με 4,186 Joule. Μπορούμε, λοιπόν να πούμε, χρησιμοποιώντας το διεθνές σύστημα μονάδων ότι η τιμή της ειδικής θερμότητας του νερού είναι 4186 J/kg·K. Είναι μια μεγάλη τιμή. Το νερό εμφανίζει μια από τις μεγαλύτερες τιμές ειδικής θερμότητας, ανάμεσα στα διάφορα υλικά. Είναι εννιά περίπου φορές πιο «δύσκολο» να ζεσταθεί μια μάζα νερού σε σχέση με μια ίση μάζα σιδήρου. Το γεγονός δεν μας είναι άγνωστο. Φτάνει να σκεφτούμε πόσο δύσκολο είναι να ζεσταθεί το νερό πάνω στο μάτι της κουζίνας, σε σχέση με το υλικό της κατσαρόλας μέσα στην οποία βρίσκεται. Το ξέρουμε και από τις καλοκαιρινές μας διακοπές. Σε σχέση με την άμμο, το πρωί η θάλασσα καθυστερεί να ζεσταθεί ενώ τα απογέματα αργεί να κρυώσει.

---

*Θεωρούμε ότι το δοχείο του θερμιδόμετρου έχει θερμοχωρητικότητα ασήμαντη.

Σε ένα θερμικά απομονωμένο σύστημα είναι $\Sigma Q = 0$.

Εφόσον γίνεται ανταλλαγή θερμότητας ανάμεσα σε δύο σώματα που ανήκουν στο σύστημα, θα υπάρχει α) ένα ποσό θερμότητας $Q_A<0$ που αποδίδεται από το θερμόμετρο και β) ένα ποσό θερμότητας $Q_B>0$ που απορροφάται από το ψυχρότερο. Θα ισχύει λοιπόν $Q_A+Q_B = 0$ ή $Q_A = -Q_B$ άρα $|Q_A| = |Q_B|$.

Ειδικές θερμότητες ορισμένων υλικών σε $Jkg^{-1}K^{-1}$

Υδρογόνο (υπό σταθ. πίεση)	14.250	Αλουμίνιο	900
Νερό	4.186	Τσιμέντο	880
Ανθρώπινο σώμα	3.470	Μάρμαρο	840
Οινόπνευμα	2.420	Τούβλο	840
Πετρέλαιο	2.100	Άμμος	820
Φελλός	2.100	Γυαλί	670-800
Πάγος	2.090	Σίδηρος	460
Καουτσούκ	1.880	Χαλκός	390
Βενζίνη	1.700	Μόλυβδος	130

Η μεγάλη ειδική θερμότητα του νερού έχει συνέπειες σημαντικές. Το νερό μετριάζει τη θερμοκρασία πάνω στη Γη και κάνει τις περισσότερες περιοχές κατοικήσιμες. Αν πάρουμε υπ' όψη μας ότι τα τρία τέταρτα περίπου της επιφάνειας του πλανήτη σκεπάζονται από νερό θα μπορέσουμε ίσως να το καταλάβουμε. Κολοσσιαίες ποσότητες ηλιακής θερμότητας απορροφώνται τα καλοκαίρια από τις θάλασσες, τις λίμνες και τους ποταμούς για να αποδοθούν σιγά σιγά, τους χειμώνες, στην ατμόσφαιρα.

Μια θερμότητα λανθάνουσα

Οι μέχρι τώρα εμπειρίες μας στα θερμικά φαινόμενα μάς έχουν, ίσως, κάνει να πιστέψουμε ότι όσο προσφέρουμε σ' ένα σώμα θερμότητα η θερμοκρασία του θα αυξάνει συνεχώς. Αυτό, όμως, δεν ισχύει σε κάθε περίπτωση. Υπάρχουν φαινόμενα κατά τα οποία η θερμότητα απορροφάται χωρίς να ανεβάζει το θερμόμετρο· είναι **οι μεταβολές φάσεων***.

Αν ξαναβάλουμε νερό σ' ένα δοχείο –όπως και πριν– και επιμείνουμε στη θέρμανσή του λίγο περισσότερο, θα έλθει κάποια στιγμή κατά την οποία το θερμόμετρο θα πάψει να ανεβαίνει παρόλο που η προσφορά θερμότητας θα συνεχίζεται.

Στο μεταξύ, εύκολα θα διακρίνουμε στο νερό τις γνωστές εκείνες φυσαλίδες που αποτελούν τα συμπτώματα του βρασμού. Βρισκόμαστε μπροστά σε μια μεταβολή κατάστασης. Άρχισε σε μια ορισμένη θερμοκρασία, η οποία για δεδομένη εξωτερική πίεση, είναι πάντοτε η ίδια, πράγμα που δεν ισχύει μόνο για το νερό αλλά και για κάθε υγρό. Η θερμοκρασία αυτή, εφόσον αναφέρεται σε πίεση μιας ατμόσφαιρας χαρακτηρίζεται ως **κανονικό σημείο βρασμού.** Για το νερό είναι 100°C εξ ορισμού. Μέχρι τη στιγμή που ολόκληρη η ποσότητα νερού θα έχει μετατραπεί σε ατμό, αποτελεί τη θερμοκρασία του συστήματος *υγρό-ατμός* και διατηρείται σταθερή.



Η θερμότητα, λοιπόν, που απορροφάται κατά το βρασμό είναι μια θερμότητα που δεν ανυψώνει θερμοκρασίες, μια θερμότητα που μετατρέπει το υγρό σε ατμό. Έχει επικρατήσει να χαρακτηρίζεται *λανθάνουσα*.

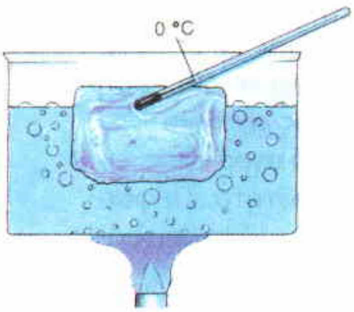


Για να μετατραπεί σε ατμό 1 kg νερού κάτω από πίεση 1 Atm απαι-

*Πολλές φορές χρησιμοποιείται ο όρος *μεταβολές καταστάσεων*.

Υλικό	Κανονικό σημείο βρασμού °C	Θερμότητα εξαέρωσης σε 10^6 J/kg
Νερό	100	2,25
Οινόπνευμα	78	0,90
Βενζίνη	80	0,40
Υδράργυρος	357	0,27
Αιθέρας	24	0,37
Αμμωνία	–33	1,43
Υδρογόνο	–252,8	0,45
Οξυγόνο	–182,9	0,21
Άζωτο	–195,8	0,20
Αλουμίνιο	2.300	10,50
Χαλκός	2.600	3,10
Σίδηρος	2.500	6,36

τούνται 2,25 x 10^6 Joule (539.000 θερμίδες) που δεν ανεβάζουν τη θερμοκρασία του συστήματος. Για πίεση 1 Atm η ποσότητα 2,25 · 10^6 J/kg είναι χαρακτηριστική για το H_2O και λέγεται **θερμότητα εξαέρωσης** παρόλο που δεν είναι θερμότητα, αλλά πηλίκο θερμότητας προς μάζα. Γενικότερα ανάμεσα στο ποσό θερμότητας –Q– και την ατμοποιούμενη (εξ αιτίας της) μάζα υγρού υφίσταται αναλογία της μορφής $Q = L_{εξ}m$, όπου $L_{εξ}$ η θερμότητα εξαέρωσης* του σώματος.



Κάτι ανάλογο μ' αυτό που συμβαίνει κατά τον βρασμό συμβαίνει και κατά την τήξη ενός στερεού, όπως, για παράδειγμα, ο πάγος. Κάτω από ορισμένη πίεση αρχίζει να λιώνει στην ίδια πάντα θερμοκρασία και σ' όλη τη διάρκεια της τήξης η θερμοκρασία του συστήματος *υγρό-στερεό* διατηρείται σταθερή. Η προσλαμβανόμενη θερμότητα είναι κι εδώ λανθάνουσα, δεν επιφέρει δηλαδή ανύψωση της θερμοκρασίας αλλά προκαλεί τη «μετάβαση» από τη στερεά στην υγρή κατάσταση. 79 kcal ή 330 kJ απαιτούνται για την πλήρη τήξη 1 kg πάγου. Η ποσότητα 79 kcal/kg ή 330 kJ/kg αποτελεί τη θερμότητα τήξης του πάγου. Κάθε στερεό σώμα, ανάμεσα στα «στοιχεία ταυτότητάς»

* Εξαέρωση είναι το γενικότερο φαινόμενο της μετάβασης από την υγρή στην αέρια φάση. Εκδηλώνεται είτε ως βρασμός είτε ως εξάτμιση.

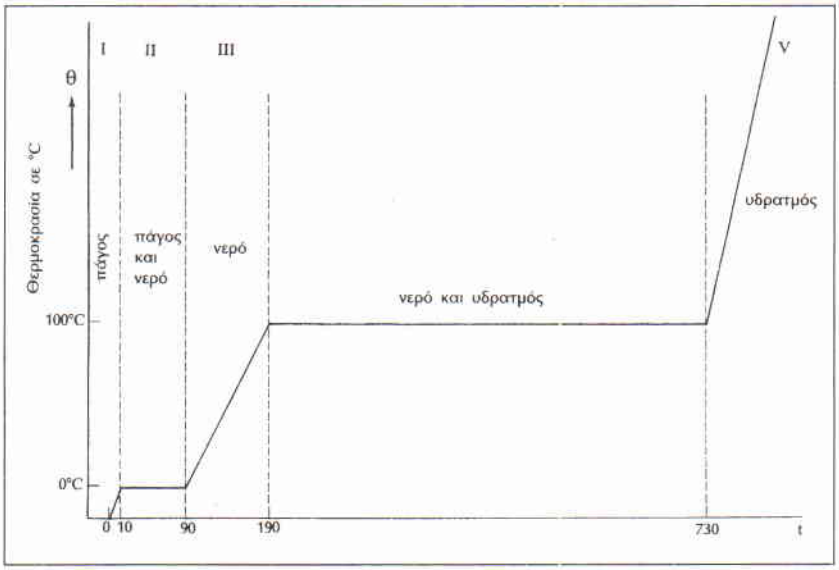
Υλικό	Κανονικό σημείο τήξης σε °C	Θερμότητα τήξης (L_T) σε 10^5 J/kg
Πάγος	0	3,30
Οινόπνευμα	–114	10,42
Υδρογόνο	–259,3	0,58
Οξυγόνο	–218,8	0,13
Άζωτο	–210,1	0,25
Αλουμίνιο	658,7	3,98
Χαλκός	1.083	1,34
Σίδηρος	1.530	2,72
Άργυρος	2.212	1,05
Μόλυβδος	327	0,24



του διαθέτει ένα **κανονικό σημείο τήξης** και μια ορισμένη **θερμότητα τήξης.** Το πρώτο είναι η χαρακτηριστική εκείνη θερμοκρασία στην οποία αρχίζει πάντοτε η τήξη του, όταν η πίεση είναι μία ατμόσφαιρα. Το δεύτερο (L_T) είναι το πηλίκο του ποσού της θερμότητας (Q) που προκαλεί την τήξη ορισμένης μάζας (m), προς τη μάζα αυτή, κάτω από πίεση 1 Atm. Χρησιμοποιώντας σύμβολα, γράφουμε $L_T = Q/m$ ή $Q = L_T m$.

Στο μεταξύ, καθώς λιώνει το στερεό, ο όγκος του υγρού που προκύπτει είναι, στη γενική περίπτωση, μεγαλύτερος. Οι εξαιρέσεις είναι ελάχιστες. Ανάμεσά τους η περίπτωση πάγου-νερού είναι ιδιαίτερα χτυπητή. Ο πάγος είναι από τα λίγα στερεά σώματα, τα οποία, σε σχέση με το υγρό τους, είναι πιο ελαφριά, έχουν δηλαδή μικρότερη πυκνότητα. Το φαινόμενο, βέβαια, μας είναι πολύ γνωστό. Ο πάγος δεν βουλιάζει στο νερό· επιπλέει.

Στα μέχρι τώρα αφέθηκε να υπονοηθεί ότι η εξωτερική πίεση επηρεάζει τόσο το σημείο βρασμού όσο και το σημείο τήξης. Το πείραμα μάς λέει ότι η αύξησή της συνοδεύεται από ανύψωση του σημείου βρασμού. Στην περίπτωση του σημείου τήξης οι μεταβολές της πίεσης έχουν μικρότερες συνέπειες. Από τις πειραματικές ενδείξεις διαπιστώνεται ότι η αύξηση της εξωτερικής πίεσης προκαλεί (α) ανύψωση του



Μέσα από ένα διάγραμμα θερμοκρασίας - χρόνου παρακολουθούμε ολόκληρη την «περιπέτεια» ενός κομματιού πάγου −20°C στο οποίο προσφέρθηκε θερμότητα με σταθερή παροχή και κάτω από σταθερή πίεση.

σημείου τήξης σε σώματα, όπως ο μόλυβδος, τα οποία κατά την τήξη παρουσιάζουν αύξηση του όγκου τους και (β) ταπείνωση του σημείου τήξης σε σώματα, όπως ο πάγος, των οποίων ο όγκος κατά την τήξη ελαττώνεται.

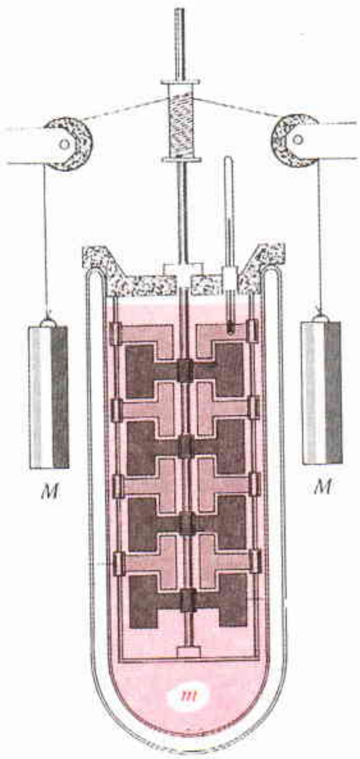
Σε σχέση με τον βρασμό η υγροποίηση (συμπύκνωση) των ατμών είναι φαινόμενο αντίστροφο. Κάτω από δεδομένη εξωτερική πίεση η υγροποίηση αρχίζει στην ίδια πάντοτε θερμοκρασία, που είναι ίδια με τη θερμοκρασία βρασμού. Κάτι ανάλογο συμβαίνει και με την πήξη των υγρών, τη μετάβαση, δηλαδή, από την υγρή στην στερεά κατάσταση.

Η θερμότητα είναι μεταβιβαζόμενη ενέργεια

Τα γεγονότα.

● Καθώς ο τορναδόρος κόβει το μέταλλο ξέρει πολύ καλά ότι αυξάνει η θερμοκρασία των υλικών. Τα υλικά, δηλαδή, θερμαίνονται χωρίς θερμότητα.

● Αν συμπιέσουμε μια ποσότητα αερίου μέσα σε δοχείο (με τοιχώματα που δεν επιτρέπουν τη ροή θερμότητας) το αέριο θερμαίνεται χωρίς θερμότητα. Κάτι ανάλογο συμβαίνει όταν θελήσουμε να φουσκώσουμε ένα λάστιχο με την τρόμπα ποδηλάτου.



● Σε ένα κλειστό σωλήνα έχουμε βάλει σκάγια 500 γραμμαρίων. Αν αναστρέψουμε το σωλήνα καμιά πενηνταριά φορές μπορούμε να ανιχνεύσουμε θερμοκρασιακή αύξηση στα σκάγια.

● Σ' ένα από τα πιο κρίσιμα πειράματα στην ιστορία της φυσικής, ο Τζέημς Πρέσκοτ Τζάουλ (1847) χρησιμοποίησε μια συσκευή στην οποία δύο βαρίδια πέφτοντας έθεταν σε περιστροφή πτερύγια βυθισμένα σε νερό με αποτέλεσμα την αύξηση της θερμοκρασίας του νερού. Το νερό μπορούσε να ζεσταθεί με έργο.

Η θεωρητική προσέγγιση.

Το κοινό στοιχείο σε όλα αυτά τα γεγονότα μπορεί κανείς να το διακρίνει

α) στο *αποτέλεσμα:* Και στις τέσσερις περιπτώσεις υπάρχει ένα σώμα (αέρας, νερό, σκάγια, μέταλλο) του οποίου αυξάνει η θερμοκρασία.

β) στην *αιτία*: Και στις τέσσερις περιπτώσεις με-

ταβιβάζεται ενέργεια με «μηχανισμό» έργου.

Μπορούμε δηλαδή να πούμε ότι η απορρόφηση θερμότητας δεν είναι ο μοναδικός τρόπος αύξησης της θερμοκρασίας. Η θέρμανση ενός σώματος μπορεί να γίνει και με μεταβιβαση ενέργειας υπό μορφή έργου. *Όταν εκτελείται έργο το αποτέλεσμα μπορεί να είναι παρόμοιο με εκείνο που προκαλεί η απορρόφηση θερμότητας.*

Από την άλλη μεριά, η εμπειρία των ατμομηχανών μάς έχει διδάξει ότι σε κάθε τέτοιου είδους μηχανή μεταβιβάζεται θερμότητα οπότε και η μηχανή μεταβιβάζει ενέργεια υπό μορφή έργου.

Η ιδέα

Κατά τους αιώνες που προηγήθηκαν, το ερώτημα «τι είναι θερμότητα» είχε βασανίσει τους θεωρητικούς και είχε προκαλέσει ποικίλες απαντήσεις.

Η πιο παλιά από αυτές αντιμετώπιζε τη θερμότητα σαν μια αόρατη φωτιά. Τον 18ο αιώνα έκανε την εμφάνισή της μια θεωρία σύμφωνα με την οποία η θερμότητα είναι ένα αόρατο ρευστό που μεταφέρεται από ένα θερμό σώμα σε ένα λιγότερο θερμό ενώ πάντοτε παραμένει ποσοτικά αμετάβλητο.

Η ιδέα ότι **η θερμότητα είναι μεταβιβαζόμενη ενέργεια** (όπως και το έργο) εμφανίστηκε κατά τα μέσα του 19ου αιώνα, συγκρούστηκε με την προηγούμενη και τελικά επικράτησε. Η εδραίωσή της σχετίστηκε με την εμπειρία της ατμομηχανής και οδήγησε την ανθρώπινη σκέψη σε έναν από τους θεμελιωδέστερους νόμους της φυσικής, τη λεγόμενη *αρχή της διατήρησης της ενέργειας.*

Η αρχή της διατήρησης της ενέργειας

Η ιδέα ότι η θερμότητα είναι μεταβιβαζόμενη ενέργεια όπως και το έργο, οδήγησε στην επίσης τολμηρή ιδέα για τη διατήρηση της ενέργειας. Ο πυρήνας της ήταν ο εξής: *Κατά την εξέλιξη οποιουδήποτε φαινομένου υπάρχει κάποια ποσότητα που εμφανίζεται με διάφορα πρόσωπα, αλλά διατηρεί πάντα την τιμή της.* Έτσι δεν μπορεί ούτε να δημιουργηθεί από το μηδέν ούτε να γίνει μηδέν. Η θερμότητα, το φως, η δυνατότητα για μηχανικό έργο, το ηλεκτρικό ρευστό, η «δύναμη των χημικών αντιδράσεων» δεν είναι παρά ορισμένες μορφές αυτής της οντότητας, που πήρε το όνομα ενέργεια.

Δώδεκα τουλάχιστον άνθρωποι, ανάμεσα στα 1832 και στα 1854, έφτασαν στην αρχή της διατήρησης της ενέργειας ανεξάρτητα και από δρόμους διαφορετικούς. Άλλοι απ' αυτούς διέσχισαν μονοπάτια καθαρά φιλοσοφικά, άλλοι καθοδηγήθηκαν από το ενδιαφέρον τους για πρακτική γνώση των μηχανών, ενώ άλλοι πάλι έφτασαν μέσα από έρευνα εργαστηριακή.

Ανάμεσά τους, ο Μάγιερ στη Γερμανία, ο Τζάουλ στην Αγγλία και ο Χέλμχολτς πάλι στη Γερμανία, μπορούμε να πούμε ότι υπήρξαν οι πιο σημαντικοί.

Mayer. Ο δρόμος του στοχασμού. Απέχοντας ουσιαστικά από πειραματικές προσπάθειες, ο Mayer - γιατρός το επάγγελμα - αφιερώθηκε στο στοχασμό και αξιοποιώντας τις παρατηρήσεις και τα διαθέσιμα στοιχεία έφτασε στην αρχή της διατήρησης. Ήταν βαθιά διαποτισμένος από τη λεγόμενη Φιλοσοφία της Φύσης (Natur Philosophie) μια πνευματική κίνηση η οποία κυριαρχούσε στη Γερμανία και πρέσβευε ότι όλα τα φαινόμενα που παρατηρούνται στη Φύση αποτελούν ιδιαίτερες εκδηλώσεις ενός ενιαίου και μοναδικού τύπου «δύναμης».

Οι συστηματικές παρατηρήσεις του πάνω στη λειτουργία

των ανθρώπινων οργανισμών τον οδήγησαν στη θεώρηση ότι η θερμοκρασία και η θερμική ενέργεια του ανθρωπίνου σώματος έπρεπε να σχετίζονται με την ενέργεια των τροφών.


JULIUS ROBERT MAYER (1814-1878)


JAMES PRESCOTT JOULE (1818-1889)


HERMANN VON HELMOLTZ (1818-1889)

Επηρεασμένος και από τη Φιλοσοφία της Φύσης κατέληξε να υποστηρίξει (1842) ότι η μηχανική ενέργεια, η χημική ενέργεια και η θερμότητα έπρεπε να είναι μορφές ισοδύναμες. Αργότερα, υπολόγισε θεωρητικά την ποσότητα θερμότητας που έπρεπε να είναι ισοδύναμη με μια μονάδα έργου.

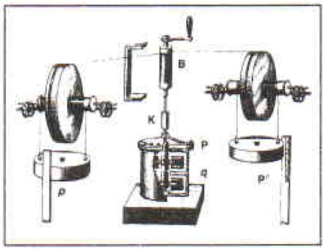
Joule. Ο δρόμος του πειράματος. Η πειραματική, όμως, έρευνα η οποία θεμελίωσε την αρχή της διατήρησης της ενέργειας έγινε στην Αγγλία. Ο James Prescott Joule, βιομήχανος μπίρας και ερασιτέχνης ερευνητής, προσέγγισε το ίδιο ζήτημα με έναν τρόπο ατόφια γαλιλαιικό. Αφέθηκε στις συσκευές και στα πειράματα να τον οδηγήσουν προς την ίδια κατεύθυνση προς την οποία είχε προχωρήσει και ο Mayer κυρίως μέσα από παρατηρήσεις και στοχασμό. Ήταν κι αυτός πεισμένος ότι η ενέργεια εμφανιζόταν με διάφορες μορφές χωρίς να μπορεί να καταστραφεί και, αγνοώντας τη φιλοσοφική προσέγγιση, αφοσιώθηκε στο να ανακρίνει τη φύση με τη γνωστή γλώσσα των μετρήσεων και των αριθμών. Επί μια δεκαετία, περίπου, δουλεύοντας συστηματικά, προσπάθησε να μετρήσει τα ποσά διαφόρων μορφών ενέργειας η οποία θα μπορούσε να μετατραπεί σε μια άλλη μορφή.

Το κρίσιμο πείραμα έγινε στα 1847 με την περίφημη συσκευή στην οποία δύο βάρη πέφτοντας έθεταν σε περιστροφική κίνηση πτερύγια βυθισμένα σε νερό. Οι μετροταινίες, τα

θερμόμετα και οι ζυγαριές έδειχναν ότι ανάμεσα στη θερμότητα και στο έργο υπήρχε μια σταθερή ποσοτική σχέση.

Τα αποτελέσματα των ερευνών του σε σημερινές μονάδες μέτρησης έδειχναν ότι σε κάθε περίπτωση η μεταβίβαση 4,17 Joule ενέργειας υπό μορφή έργου ισοδυναμεί (προκαλεί στο ίδιο σώμα την ίδια αύξηση θερμοκρασίας) με απορρόφηση θερμότητας μιας θερμίδας.

Τα αποτελέσματα βρίσκονται πολύ κοντά σ' αυτό που πιστεύουμε σήμερα. Η ποσότητα 4,186 Joule/cal αποτελεί το λεγόμενο *μηχανικό ισοδύναμο της θερμίδας.*



Η συσκευή που χρησιμοποίησε ο Joule, σε γκραβούρα της εποχής.

Η διατήρηση της ενέργειας. Τέλος, στα 1847, ο Helmholtz θα διατυπώσει καθαρά την ιδέα ότι όλες οι μορφές ενέργειας είναι ισοδύναμες και ότι ένα ορισμένο ποσό μιας μορφής δεν μπορεί να εξαφανιστεί χωρίς να εμφανιστεί στη θέση του ένα ισοδύναμο ποσό ενέργειας με κάποιο άλλο «πρόσωπο». Κι από την άλλη, κάθε μηχανή που μας προσφέρει ενέργεια δεν μπορεί να κάνει τίποτα αν δεν πάρει ενέργεια από κάποια άλλη πηγή. Λίγα χρόνια μετά, σε μια διάλεξη, θα διατυπώσει την αρχή της διατήρησης ακόμα πιο καθαρά.

Μπορούμε να πούμε ότι το σύμπαν περιέχει μια ποσότητα ενέργειας που δεν μπορεί με κανέναν τρόπο ούτε να αυξηθεί ούτε να γίνει λιγότερη. Η ποσότητα ενέργειας του σύμπαντος είναι αιώνια και αμετάβλητη όπως και η μάζα του. Μ' αυτά τα λόγια σάς αναγγέλλω ένα μεγάλο νόμο της φύσης, την αρχή της διατήρησης της ενέργειας.

Η αρχή της διατήρησης υποστηρίζει κάτι οπωσδήποτε τολμηρό. Μας λέει ότι όση ενέργεια υπάρχει σήμερα το απόγευμα, υπήρχε και την εποχή που ο άνθρωπος ακόμα δεν είχε ανακαλύψει τη φωτιά. Πώς μπορούμε όμως να δεχτούμε μια τέτοια δήλωση όταν δεν είμαστε σε θέση να μετρήσουμε ούτε το ποσό του πετρελαίου ή του κάρβουνου που υπάρχει στη Γη; Το μόνο που μπορούμε να απαντήσουμε είναι ότι τα μηνύματα που έρχονται απ' όλα τα πειράματα των τελευταίων εκατό ετών δείχνουν ότι σε μια μεγάλη ποικιλία διεργασιών πάνω στη γη, κάθε εξαφάνιση ενέργειας συνοδεύεται από μια ταυτόχρονη εμφάνιση ενέρ-

γειας άλλης μορφής και ποσοτικά ισοδύναμης.

Αν μαζί με τη διατήρηση της ενέργειας «αντικρίσουμε» και τους άλλους παγκόσμιους νόμους που υποστηρίζουν τη διατήρηση της μάζας, της ορμής και του ηλεκτρικού φορτίου, θα έχουμε μπροστά μας ένα σύνολο νόμων που βρίσκονται στην ίδια λογική: **Κατά τη διάρκεια των ποικίλων αλλαγών υπάρχουν κάποιες ποσότητες που διατηρούνται αναλλοίωτες.** Είναι μια λογική συμφιλίωσης ανάμεσα σε διατήρηση και αλλαγή.

Θερμοδυναμική. Η μελέτη των μετατροπών ενέργειας από μία μορφή σε μία άλλη και των ανταλλαγών ενέργειας ανάμεσα στα διάφορα συστήματα έχει παραδοσιακά επικρατήσει να λέγεται *θερμοδυναμική*. Το όνομά της το χρωστάει στην καταγωγή της. Στο ξεκίνημα περιοριζόταν σε προσπάθειες να εξηγήσει και να ποσοτικοποιήσει τη σχέση μηχανικής ενέργειας και θερμότητας. Σήμερα το αντικείμενό της έχει διευρυνθεί. Αποτελεί ένα σπουδαίο εργαλείο για τη μελέτη της απόδοσης κάθε τύπου μηχανής ενώ, απ' την άλλη, μας βοηθάει να κατανοήσουμε τις ενεργειακές διεργασίες που γίνονται στα διάφορα βιολογικά και γεωλογικά συστήματα. Περιέχει δύο ιδέες «συμπαντικές». Η πρώτη απ' αυτές μας λέει ότι η **ενέργεια διατηρείται** ενώ η δεύτερη ότι η **ενέργεια υποβαθμίζεται.**

Ο πρώτος νόμος της θερμοδυναμικής

Μπορούμε τώρα πια να συνθέσουμε τις διάφορες ιδέες που εμφανίστηκαν σ' αυτό το κεφάλαιο έτσι ώστε να φτάσουμε σε μια μαθηματική διατύπωση για τη διατήρηση της ενέργειας, μια διατύπωση η οποία έχει επικρατήσει να θεωρείται ως ο *πρώτος νόμος της θερμοδυναμικής*. Θα ακολουθήσουμε το παρακάτω πρόγραμμα:

α. Σε μια πρώτη φάση θα αποσαφηνίσουμε *πώς* γίνονται οι ενεργειακές ανταλλαγές κάθε συστήματος με το περιβάλλον του. Κατάληξη θα είναι να δούμε τη θερμοδυναμική όψη των εννοιών **έργο** και **θερμότητα.**

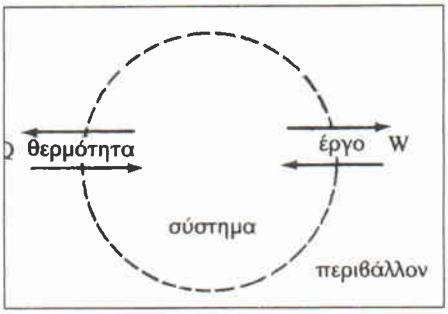
β. Στη συνέχεια θα αναρωτηθούμε σχετικά με το *τι περιέχεται* σ' ένα σύστημα. Ο προβληματισμός θα μας οδηγήσει στην έννοια *ολική ενέργεια ενός συστήματος* **(ενέργεια εσωτερική και ενέργεια μηχανική).**

γ. Τέλος, θα επιχειρήσουμε να συμπεριλάβουμε σ' έναν ενιαίο νόμο τη σχέση ανάμεσα στο ενεργειακό περιεχόμενο κάθε συστήματος και τα ποσά ενέργειας που ανταλλάσσει με το περιβάλλον του.

Οι δύο «μηχανισμοί» ανταλλαγής ενέργειας

Οι μηχανισμοί μεταβίβασης ενέργειας είναι δύο. Ο ένας σχετίζεται με την έννοια **θερμότητα.** Η θερμότητα είναι ενέργεια η οποία δεν ανήκει σε κάποιο σύστημα αλλά μόνο μεταβιβάζεται από ένα σύστημα σ' ένα άλλο εφόσον οι θερμοκρασίες των δύο συστημάτων είναι διαφορετικές.

Ο άλλος μηχανισμός μεταβίβασης ενέργειας σχετίζεται με την έννοια **έργο.** Αναφέρεται σε όλες τις διεργασίες μεταφοράς ενέργειας εκτός από εκείνες που οφείλονται σε διαφορά



θερμοκρασιών.

«Σύστημα» μπορεί να είναι ένα ηλεκτρόνιο είτε ένα φλούδι από πασατέμπο, μια ηλεκτρική γεννήτρια, κάποιος που διαβάζει την εφημερίδα του, είτε το νερό μιας λίμνης, όπως μπορεί να είναι και η Μεγάλη Άρκτος ολόκληρη. Μπορεί να είναι οτιδήποτε. Σε κάθε περίπτωση το υπόλοιπο σύμπαν θα αποτελεί το περιβάλλον του. Τα ενεργειακά «πάρε-δώσε» κάθε συστήματος με το περιβάλλον του γίνονται και μετρώνται με έργο και με θερμότητα.

Όπως και για τη θερμότητα, δεν μπορούμε να λέμε ότι το τάδε σύστημα περιέχει έργο, αλλά ότι το τάδε σύστημα μεταβιβάζει ενέργεια σ' ένα άλλο μέσω έργου. Με το έργο και τη θερμότητα εκφράζουμε, λοιπόν, τους δύο μηχανισμούς με τους οποίους ένα σύστημα ανταλλάσσει ενέργεια με το περιβάλλον του.

Η ενέργεια που περιέχεται σ' ένα σύστημα

Μέχρι τώρα τονίσαμε ότι το έργο και η θερμότητα δεν «ανήκουν» σε κάποιο σύστημα. Τι είναι, όμως, αυτό που ανήκει; Ποια είναι, για παράδειγμα, η ενέργεια που περιέχεται σε ένα ακίνητο πορτοκάλι;

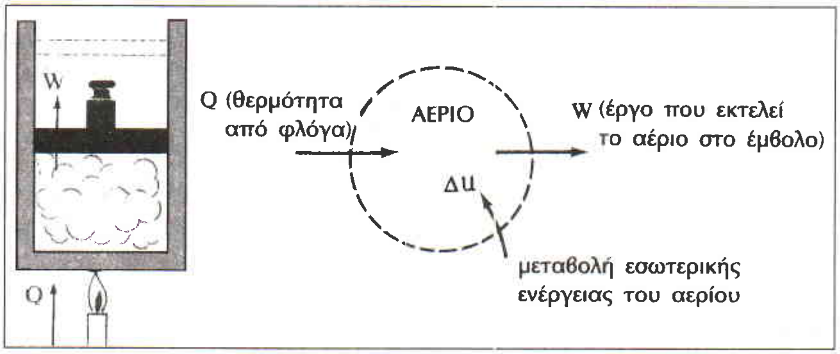
Έχουμε μάθει να λέμε ότι τα συστήματα έχουν κινητική και δυναμική ενέργεια. Είναι όμως αυτό αρκετό να μας πληροφορήσει γι' αυτό που κρύβεται σ' ένα ακίνητο κομμάτι κάρβουνο ή σε ένα πορτοκάλι που βρίσκεται στο καφάσι του μανάβικου; Μπορεί να μας περιγράψει αυτό που περιέχεται σ' ένα φλιτζάνι με ζεστό καφέ;

Είναι φανερό ότι η ενέργεια κίνησης και η ενέργεια των εξωτερικών αλληλεπιδράσεων –αυτό δηλαδή που συμφωνήσαμε να λέμε μηχανική ενέργεια– δεν επαρκούν. Χρειάζεται να επινοήσουμε κάποιο μέγεθος με διαστάσεις ενέργειας που να περιγράφει τις εσωτερικές ενεργειακές διεργασίες που συμβαίνουν στα διάφορα συστήματα. Αυτά δηλαδή που γίνονται πέρα από τις φανερά εκδηλούμενες μεταβολές της μηχανικής ενέργειας.

Το μέγεθος έχει επινοηθεί. Το λέμε **ενέργεια εσωτερική.**

Για να το κατανοήσουμε, ας φανταστούμε κάποιες διεργασίες κατά τις οποίες η μηχανική ενέργεια θα διατηρείται σταθερή.

Ένα καλό παράδειγμα είναι η θέρμανση μιας ποσότητας αερίου υπό σταθερή πίεση. Ας την παρακολουθήσουμε.



Σύστημα θα είναι το αέριο. Παίρνει ενέργεια με θερμότητα και δίνει ενέργεια στο έμβολο με έργο. Η μηχανική ενέργεια του αερίου δεν μεταβάλλεται. Αυτό που μεταβάλλεται είναι η εσωτερική του ενέργεια.

Ένα δεύτερο παράδειγμα. Ο πάγος ανταλλάσσει ενέργεια με το περιβάλλον χωρίς να μεταβάλλεται η μηχανική του ενέργεια. Λέμε κι εδώ ότι μεταβάλλεται η εσωτερική του ενέργεια.

Η γενίκευση

Εκτός όμως από διεργασίες «εσωτερικές» –που θα τις λέμε μικροσκοπικές– είναι δυνατόν να εμφανιστούν και οι γνωστές μας «εξωτερικές –μακροσκοπικές μπορούμε να λέμε– μεταβολές.

Πρόκειται για τις μεταβολές στην κινητική κατάσταση ή στη διάταξη των μερών ενός συστήματος, οι οποίες περιγράφονται ως μεταβολές στην κινητική (K) και δυναμική (U) ενέργεια, δηλαδή στη μηχανική ενέργεια ($E_\mu = K + U$) του συστήματος. Αν θέλουμε, λοιπόν, ένα γενικό νόμο που να περιλαμβάνει τόσο τις εσωτερικές (από μικροσκοπική άποψη) όσο και τις εξωτερικές (από μακροσκοπική άποψη) μεταβολές, είμαστε υποχρεωμένοι να γράφουμε

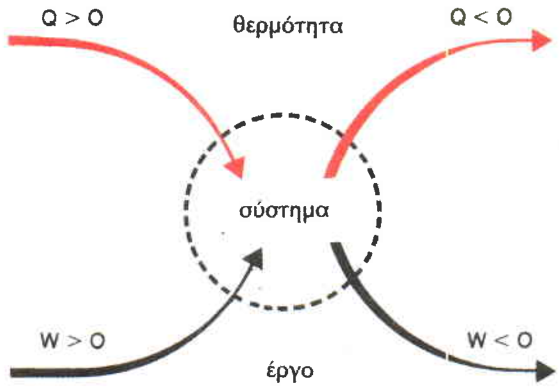
$$W + Q = \Delta u + \Delta E_\mu \quad \text{ή} \quad W + Q = \Delta (u + E_\mu)$$

Δεν μείνει παρά να συμφωνήσουμε το άθροισμα $u + E_\mu$ να το

λέμε **ολική ενέργεια του συστήματος** και να το συμβολίζουμε με Ε. Τελικά, θα γράφουμε:

$$\Delta E = W + Q$$

πρώτος νόμος της θερμοδυναμικής



Αν η θερμότητα εισέρχεται στο σύστημα θα είναι $Q>0$, ενώ αν αποδίδεται από το σύστημα, $Q<0$.
Ως έργο (W) εννοείται το έργο των δυνάμεων που ασκούνται από το περιβάλλον στο σύστημα. Αν $W>0$ σημαίνει ότι το περιβάλλον εκτελεί έργο στο σύστημα, μεταβιβάζει δηλαδή ενέργεια στο σύστημα. Αν $W<0$ σημαίνει ότι το σύστημα εκτελεί έργο, μεταβιβάζει δηλαδή ενέργεια στο περιβάλλον.

Τι σχέση έχει, όμως, αυτή η εξίσωση με την αρχή της διατήρησης; Είναι φανερό ότι την περιέχει. Σε περίπτωση που $Q=0$ και $W=0$ θα είναι $\Delta E = 0$ ή $E =$ σταθερή. Ένα τέτοιο σύστημα, το οποίο δεν ανταλλάσσει ενέργεια με το περιβάλλον του ούτε με έργο ούτε με θερμότητα θα το λέμε **κλειστό** και θα μπορούμε να ισχυριστούμε ότι η ολική ενέργεια ενός συστήματος διατηρείται σταθερή. Τι λέτε τώρα για το σύμπαν;
Το άθροισμα E_μ + **U** είναι σταθερό για ένα δοσμένο σύστημα αν οι εσωτερικές αλλαγές δεν επηρεάζουν παρά μόνο το ίδιο το σύστημα και όχι το εξωτερικό περιβάλλον. Θεωρούμε για παράδειγμα, ένα εκκρεμές που αιωρείται στον αέρα. Είναι γνωστό ότι η E_μ του εκκρεμούς ελαττώνεται εξαιτίας της παρουσίας του αέρα. Το εκκρεμές και ο αέρας στο κλειστό σύστημα, ζεσταίνονται ελαφρά.

Σημειώσεις



1. Οι μηχανικοί προτιμούν να θεωρούν θετικό το έργο που *εκτελεί* το αέριο. Έτσι γράφουν τον πρώτο θερμοδυναμικό νόμο με τη μορφή $\Delta U = Q - W$
2. Εκτός από το έργο και τη θερμότητα ένας ακόμα μηχανισμός ανταλλαγής ενέργειας, ο οποίος όμως δεν θα μας απασχολήσει εδώ, είναι η ακτινοβολία (R). Γενικότερα λοιπόν η εξίσωση του πρώτου νόμου μπορεί να γραφεί: $\mathbf{Q + W + R = \Delta E}$.
3. Σε ορισμένες περιπτώσεις θα χρησιμοποιούμε τον όρο *θερμική ενέργεια* για να εκφράσουμε το μέρος εκείνης της εσωτερικής ενέργειας, που οι μεταβολές του αντανακλώνται στις θερμοκρασιακές μεταβολές.

Σε αντίθεση με τη θερμότητα, η οποία έχει νόημα μόνο ως ενέργεια μεταβιβαζόμενη, θα μπορούμε να λέμε ότι ένα σώμα «έχει» θερμική ενέργεια, η οποία μεταβάλλεται εφόσον στο σώμα παρατηρείται κάποια θερμοκρασιακή αλλαγή. Όταν σβήνουμε κάτι, τρίβοντας πολλή ώρα τη γομολάστιχα πάνω στο τετράδιο, η γομολάστιχα ζεσταίνεται. Σύμφωνα με τη θερμοδυναμική δεν μπορούμε να πούμε ότι μεταβιβάσθηκε θερμότητα. Η θερμότητα μεταβιβάζεται μόνο εξαιτίας κάποιας θερμοκρασιακής διαφοράς και τέτοια διαφορά δεν υπάρχει. Μπορούμε όμως να πούμε ότι το έργο που εκτελέστηκε προκάλεσε αύξηση στη θερμική ενέργεια του συστήματος. Όταν η τριβή προκαλεί αύξηση της θερμοκρασίας του σώματος, μπορούμε να λέμε ότι προκαλεί και αύξηση στη θερμική ενέργεια του σώματος.



Ενέργεια και μικρόκοσμος

Λίγο μετά τα μέσα του περασμένου αιώνα, η ιδέα ότι η θερμότητα είναι μορφή ενέργειας ισοδύναμη με τις άλλες μορφές έχει αρχίσει να γίνεται πλατιά αποδεκτή. Μια από τις συνέπειες αυτής της αποδοχής είναι και η αναζωπύρωση του ενδιαφέροντος για μια παλιά αντίληψη η οποία για αιώνες επιβίωνε μόνο περιθωριακά και υποστήριζε ότι *η θερμότητα σχετίζεται με την κίνηση των μικροσκοπικών δομικών συστατικών της ύλης*. Μέσα από αυτήν την αντίληψη οι φυσικοί άρχισαν να αναζητούν αυτό που έλειπε. Τον ενωτικό κρίκο που πίστευαν ότι έπρεπε να συνδέει τις διάφορες μορφές ενέργειας.

Μια εδραιωμένη πεποίθηση για τις δυνατότητες της νευτωνικής και μία ακόμα πολύ παλιότερη θεωρία, που φαινόταν να έχει ανανεωθεί, δημιούργησαν τελικά το κατάλληλο πλαίσιο. Η πεποίθηση ήταν ότι όλα τα φαινόμενα θα μπορούσαν να εξηγηθούν με τους νόμους της νευτωνικής δυναμικής, ενώ η παλιά θεωρία ήταν η Ατομική θεωρία του Δημόκριτου, η οποία από τις αρχές του αιώνα άρχισε να εφαρμόζεται με μεγάλη επιτυχία από τον Dalton (Ντάλτον), στην ερμηνεία των χημικών διεργασιών. Σ' αυτό το πλαίσιο, πολλοί φυσικοί επιχείρησαν να εφαρμόσουν τους γνωστούς νευτωνικούς νόμους του μακρόκοσμου στο μεγάλο πλήθος των κινουμένων σωματιδίων, τα οποία είχαν δεχτεί ότι συγκροτούν την ύλη. Ο στόχος ήταν να ερμηνεύσουν όλα τα φαινόμενα, τα οποία περιέγραφε η θερμοδυναμική. Τα καίρια ερωτήματα ήταν:

- Πώς θα έπρεπε να συμπεριφέρονται τα κινούμενα σωματίδια ώστε να δικαιολογείται η πειθαρχία των συστημάτων στους πειραματικούς νόμους της θερμοδυναμικής;
- Ποιά σχέση θα μπορούσε να υπάρχει ανάμεσα σ' αυτά που διαβάζουμε στα θερμόμετρα και τα μανόμετρα και στις

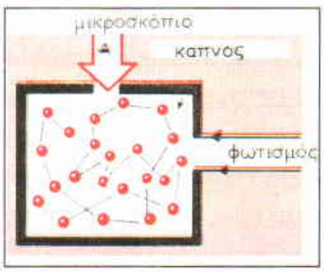
κινήσεις των αόρατων σωματιδίων;

Το πρόβλημα έδειχνε ότι μπορούσε να προσεγγιστεί ευκολότερα από την πλευρά των αερίων. Και αυτό έγινε. Η καινούρια θεωρία ονομάστηκε *κινητική θεωρία*. Η πρώτη σοβαρή έρευνα ξεκίνησε στα 1857 από το Γερμανό καθηγητή Rudolf Clausius (Ρούντολφ Κλαούζιους, 1822-1888). Λίγα χρόνια αργότερα, δύο από τους μεγαλύτερους φυσικούς του αιώνα εμφανίστηκαν στο προσκήνιο και πέτυχαν να εμπλουτίσουν την καινούρια θεωρία. Ήταν ο Σκωτσέζος James Clerk Maxwell (Τζέιμς Κλαρκ Μάξγουελ, 1831-1879) και ο Αυστριακός Ludwig Boltzmann (Λούντβιχ Μπόλτσμαν, 1844-1906).

Άτομα και μόρια

Σήμερα πιστεύουμε ότι σε ένα μεγάλο πλήθος φαινομένων η ύλη συμπεριφέρεται σαν να αποτελείται από άτομα.

Τα άτομα είναι πολλά και μικρά. Τόσο μικρά και τόσο πολλά που $6{,}023 \cdot 10^{23}$ «χωράνε» σε κάθε γραμμομόριο μιας ουσίας. 10^{23} περίπου άτομα σε τρία γραμμάρια νερού. Αρκεί να σκεφτούμε ότι ο αριθμός των κόκκων της άμμου που υπάρχουν σε μια μεγάλη παραλία 20m x 50m με στρώμα πάχους ενός μέτρου είναι «μόνο» 10^{14}. Οι κόκκοι δηλαδή 1.000.000.000 παραλιών είναι ισάριθμοι με τα άτομα τριών γραμμαρίων νερού.



Σε ένα κουτί που φωτίζεται από το πλάι, εισάγεται καπνός από τσιγάρο. Το μικροσκόπιο αποκαλύπτει ότι κάθε κόκκος καπνού φαίνεται να κινείται ακανόνιστα. Μοιάζει με κίνηση μπάλας ποδοσφαίρου που την κλωτσάνε αόρατοι παίκτες. Ποιος ευθύνεται γι' αυτό το ασταμάτητο ζιγκ-ζαγκ;

Τα άτομα κινούνται αδιάκοπα. Από την εποχή του Δημόκριτου τα άτομα δεν είναι μόνο ά-τομα (αδιαίρετα), είναι ταυτόχρονα και αδιάκοπα κινούμενα σωματίδια. Η πρώτη σχετικά άμεση μαρτυρία για την αδιάκοπη κίνηση των σωματιδίων πρέπει να υπήρξε από το Σκωτσέζο βοτανολόγο Robert Brown (Ρόμπερτ Μπράουν, 1773-1858) στα 1827.

Τα άτομα δεν είναι ά-τομα. Δεν είναι δηλαδή αδιαίρετα. Στο μοντέλο που χρησιμοποιεί ο εικοστός αιώνας το άτομο αποτελείται από πυρήνα και ηλεκτρόνια. Ο πυρήνας, στον οποίο συγκεντρώνεται όλη σχεδόν η μάζα του ατόμου

Μια αέναη άτακτη κίνηση. Στα 1827 ο Brown, εξετάζοντας κάτω από το μικροσκόπιο κόκκους γύρης μέσα σε μια σταγόνα νερό, παρατήρησε ότι οι κόκκοι εκτελούσαν μια άτακτη κίνηση, έναν περίπατο άσκοπο. Η κίνηση έμοιαζε με περπάτημα μεθυσμένου. Στην αρχή πίστεψε ότι οι κόκκοι είχαν ζωή. Όταν όμως παρατήρησε μια ανάλογη κίνηση μέσα σε μια σταγόνα νερού, παγιδευμένη εκατομμύρια χρόνια σ' ένα κομμάτι ορυκτού χαλαζία, κατάλαβε ότι το φαινόμενο δεν έχει σχέση με τη ζωή. Οι ανόργανοι κόκκοι «περπατούσαν» κι αυτοί με τον ίδιο τρόπο. Το φαινομενο ονομάστηκε *κίνηση Brown*. Για οκτώ περίπου δεκαετίες έμεινε ανεξήγητο. Στα 1905 ο Einstein έδωσε μια εξήγηση. Το καταπληκτικό στην υπόθεση αυτή, γράφει ο ίδιος ο Einstein, είναι ο *αδιάκοπος* χαρακτήρας της κίνησης. Η χαοτική κίνηση των κόκκων οφείλεται στον αδιάκοπο βομβαρδισμό τους απ' όλες τις πλευρές από μυριάδες σωμάτια –μόρια του νερού– που είναι πολύ μικρότερα από τον κόκκο. Τα συμπεράσματα είναι δύο. *Πρώτο*. Το νερό όσο και να φαίνεται συνεχές αποτελείται από σωματίδια-μόρια. *Δεύτερο*. Τα μόρια βρίσκονται σε αδιάκοπη, άτακτη, τυχαία κίνηση. Αυτά ακριβώς που διαλαλούσαν οι θιασώτες της κινητικής θεωρίας τον 19ο αιώνα. Ήταν η πρώτη και άμεση επιβεβαίωση της ατομικής και της κινητικής θεωρίας.

συγκροτείται από πρωτόνια και νετρόνια τα οποία με τη σειρά τους συγκροτούνται από κουάρκ. Τα κουάρκ θεωρούνται σήμερα στοιχειώδη σωματίδια.

Τα σωματίδια αλληλεπιδρούν. Το είδος, το μέγεθος της αλληλεπίδρασης και η εμβέλεια της, η απόσταση δηλαδή στην οποία εκδηλώνεται, ποικίλουν με το είδος των σωματίων. Κατά τις αλληλεπιδράσεις η ενέργεια διατηρείται, το ίδιο και η ορμή.

Οι αλληλεπιδράσεις ατόμων με άτομα οδηγούν πολλές φορές στο σχηματισμό σύνθετων συγκροτημάτων που λέγονται **μόρια**. Ένα μόριο μπορεί να είναι τόσο απλό όσο και το μόριο του υδρογόνου, που αποτελείται από δύο μόνο όμοια άτομα, αλλά και τόσο σύνθετο όσο η διπλή έλικα του δεσοξυριβοζονουκλεινικού οξέος, του περίφημου DNA, που συγκροτείται

από χιλιάδες άτομα και αποτελεί το βασικό δομικό συστατικό της ζωής.

Εσωτερική ενέργεια και μικρόκοσμος

Στον πρώτο νόμο της θερμοδυναμικής αναγνωρίσαμε την ανάγκη για ένα καινούριο μέγεθος. Τα πειράματα μας επέτρεψαν να το εισάγουμε και να εκφράζουμε μ' αυτό τις εσωτερικές διεργασίες, που συμβαίνουν στα διάφορα συστήματα. Το ονομάσαμε *εσωτερική ενέργεια*.

Ας δούμε τώρα την εσωτερική ενέργεια από τη σκοπιά του μικρόκοσμου. Η *εικόνα* της ύλης, από τη σκοπιά αυτή, περιέχει **κίνηση** και **αλληλεπίδραση.** Κάθε σύστημα αποτελείται από μόρια που κινούνται και αλληλεπιδρούν. Κάθε μόριο αποτελείται από άτομα που κινούνται και αλληλεπιδρούν. Κάθε άτομο αποτελείται από πυρήνα και ηλεκτρόνια που αλληλεπιδρούν. Σε κάθε αλληλεπίδραση αντιστοιχεί μία ορισμένη δυναμική ενέργεια και σε κάθε κίνηση σωματιδίου μια ορισμένη κινητική ενέργεια. Ας φανταστούμε **το άθροισμα όλων αυτών των ενεργειών.** Οι προσθετέοι του θα είναι όλες οι δυναμικές ενέργειες αλληλεπίδρασης των σωματιδίων και όλες οι κινητικές ενέργειες ως προς το κέντρο μάζας του συστήματος.

Η φυσική μάς προτείνει να αποδεχτούμε ότι **αυτό το άθροισμα αποτελεί την εσωτερική ενέργεια του συστήματος.** Πρόκειται για το ίδιο μέγεθος, η μεταβολή του οποίου ορίζεται ($\Delta U = Q + W$) από τον πρώτο νόμο της θερμοδυναμικής. Αυτό σημαίνει ότι εφόσον σε κάποιο σύστημα μεταβιβάζεται ενέργεια χωρίς να αποδίδεται ενέργεια στο περιβάλλον το γεγονός περιγράφεται:

από τη σκοπιά του μακρόκοσμου
μεταβιβάζεται ενέργεια ως έργο ή και ως θερμότητα.

από τη σκοπιά του μικρόκοσμου
αυξάνει το άθροισμα των κινητικών και των δυναμικών ενεργειών των σωματιδίων που συγκροτούν το σύστημα.

Κινητική θεωρία

1. Ιδανικό αέριο.

Από τη μια ο μακρόκοσμος των πειραμάτων και των μετρήσεων και από την άλλη ο μικρόκοσμος με τα αδιάκοπα κινούμενα σωματίδια. Η κινητική θεωρία των αερίων επιχειρεί να συνδέσει του δύο κόσμους προτείνοντας ένα μοντέλο το οποίο ονομάζεται *ιδανικό αέριο.*

Από τη σκοπιά του μικρόκοσμου το ιδανικό αέριο είναι ένα σύνολο κινουμένων σωματιδίων με ορισμένες ιδιαιτερότητες:

- Ο συνολικός όγκος των σωματιδίων θεωρείται –σε σχέση με τον όγκο του δοχείου– αμελητέος.
- Τόσο οι μεταξύ των μορίων συγκρούσεις όσο και εκείνες των μορίων με τα τοιχώματα του δοχείου θεωρούνται απολύτως ελαστικές.
- Τα σωματίδια υπακούουν στους νευτωνικούς νόμους της κίνησης
- Δεν ασκούνται δυνάμεις μεταξύ των μορίων παρά μόνο κατά τη διάρκεια των συγκρούσεων.

Αυτό σημαίνει ότι η μεταξύ δύο συγκρούσεων κίνηση κάθε μορίου είναι ευθύγραμμη ομαλή και ότι δεν υπάρχει δυναμική ενέργεια. **Η εσωτερική ενέργεια του ιδανικού αερίου είναι, συνεπώς, άθροισμα κινητικών ενεργειών.**

2. Πίεση και μικρόκοσμος.

Ένα από τα πρώτα ερωτήματα είναι αυτό για την πίεση ενός αερίου. Ο αόρατος αέρας της σχολικής αίθουσας ασκεί πίεση στο τζάμι του παραθύρου, στην καρέκλα του καθηγητή, στους τοίχους και η τιμή της είναι αυτή που διαβάζουμε στο κατάλληλο όργανο. Την ίδια στιγμή, στην προτεινόμενη *εικόνα του μικρόκοσμου,* επτάκις περίπου εκατομμύρια αεικίνητα μόρια κυρίως οξυγόνου και αζώτου κτυπούν σε τζάμια, σε τοίχους, σε ανθρώπινα σώματα.

Ποια είναι η σχέση της πίεσης με τα κινούμενα αυτά μόρια;

Βασιζόμενοι στο μοντέλο του ιδανικού αερίου και εφαρμόζοντας τους νευτωνικούς νόμους της κίνησης η θερμοδυναμι-

κή οδηγείται σ' ένα αναμενόμενο συμπέρασμα. Ότι η πίεση ενός αερίου σχετίζεται τόσο α) με τον ανά μονάδα όγκου αριθμό των κινουμένων μορίων όσο και β) με την κίνησή τους. Συγκεκριμένα, καταλήγει σε μια εξίσωση η οποία εκφράζει ότι:

Η πίεση είναι ανάλογη προς την πυκνότητα και προς τον μέσον όρο των τετραγώνων των ταχυτήτων που έχουν τα κινούμενα μόρια εκείνη τη στιγμή.

3. Θερμοκρασία και μικρόκοσμος

Τι συμβαίνει όμως με τη θερμοκρασία; Ποια σχέση υπάρχει ανάμεσα σ' αυτό που μας δείχνει ένα θερμόμετρο και σε όσα εκείνη τη στιγμή συμβαίνουν στον μικρόκοσμο ενός αερίου;

Η απάντηση σ' αυτό το ερώτημα είναι λιγότερο αναμενόμενη από την προηγούμενη. Η θερμοδυναμική καταλήγει στο συμπέρασμα ότι **η θερμοκρασία** σχετίζεται μόνο με την κίνηση των μορίων και συγκεκριμένα **είναι ανάλογη προς το μέσον όρο των κινητικών ενεργειών όλων των μορίων κατά τη στιγμή εκείνη.**

Σε ένα ιδανικό αέριο
(από τη σκοπιά του μικρόκοσμου)

Η εσωτερική ενέργεια: είναι ίση με το άθροισμα των κινητικών ενεργειών όλων των σωματιδίων

Η θερμοκρασία: είναι ανάλογη προς τον μέσο όρο των κινητικών ενεργειών όλων των σωματιδίων.

Ο δεύτερος νόμος της θερμοδυναμικής

Η ατμομηχανή αποδείχθηκε μια πολύ καλή δασκάλα της ανθρωπότητας. Μας έμαθε ότι πολλά πράγματα *είναι δυνατόν* να γίνουν και ότι πολύ περισσότερα *είναι αδύνατον να* πραγματοποιηθούν. Μια από τις εμπειρίες που αποκτήθηκαν από τη λειτουργία της οδήγησε τη θεωρητική σκέψη στην ιδέα για την υποβάθμιση της ενέργειας, η οποία εμπεριέχεται στον *δεύτερο νόμο της θερμοδυναμικής.*

Το έργο είναι πολυτιμότερο από τη θερμότητα

Ένα από τα διδάγματα της εμπειρίας που αποκτήσαμε από τις ατμομηχανές είναι το ότι κατά τη λειτουργία μιας οποιασδήποτε μηχανής είναι αδύνατον να μεταβιβάζουμε ενέργεια 100, λόγου χάριν, μονάδων ως θερμότητα και να μας αποδίδει 100 μονάδες έργου. Ακόμα και αν υπήρχε μηχανή που να λειτουργεί χωρίς τριβές μια ποσότητα θερμότητας θα αποδίδεται αναπόφευκτα και αυτό όχι για λόγους τεχνικούς.

Η εμπειρία μας διδάσκει ότι η μεταβιβαζόμενη ως έργο ενέργεια μπορεί εξολοκλήρου να μετατραπεί σε θερμική ενέργεια.

Γενικεύοντας το δίδαγμα αυτό ο λόρδος Kelvin διατύπωσε με σαφήνεια κάτι που η φύση φαίνεται να μας απαγορεύει να το πραγματοποιήσουμε.

Είναι αδύνατο να κατασκευάσουμε μία θερμική μηχανή που να μπορεί να μετατρέπει ένα ποσό θερμότητας ολόκληρο σε μηχανικό έργο.

Η πρόταση αποτελεί μια από τις διατυπώσεις του *δεύτερου νόμου της θερμοδυναμικής.*

Τα παραπάνω μας οδηγούν στην ιδέα ότι η μεταβιβαζόμενη ως έργο ενέργεια είναι πολυτιμότερη από ισόποση ενέργεια μεταβιβαζόμενη ως θερμότητα.

Θερμότητα πολυτιμότερη από ισόποση θερμότητα

α. Είναι γνωστό ότι η θερμότητα είναι ενέργεια που μεταβιβάζεται αυθόρμητα από ένα σώμα Σ προς ένα άλλο Σ αρκεί η θερμοκρασία του Σ να είναι χαμηλότερη. Το ότι η μεταβίβαση γίνεται αυθόρμητα και προς συγκεκριμένη κατεύθυνση σημαίνει ότι συντελείται χωρίς να χρειάζεται ταυτόχρονα να συντελείται κάποιο άλλο φαινόμενο στον κόσμο.

β. Η εμπειρία μας έχει, επίσης, διδάξει ότι το αντίθετο φαινόμενο, η αυθόρμητη δηλαδή μεταβίβαση θερμότητας από το ψυχρότερο σώμα προς το θερμότερο είναι αδύνατο να συμβεί. Ο μόνος τρόπος για να πραγματοποιηθεί είναι να μεταβιβάζεται ταυτόχρονα ενέργεια υπό μορφή έργου. **Είναι αδύνατον να κατασκευάσουμε μια μηχανή στην οποία να μεταβιβάζουμε θερμότητα υπό χαμηλή θερμοκρασία και να αποδίδει θερμότητα υπό υψηλή θερμοκρασία χωρίς κατανάλωση έργου** υποστήριξε ο Rudolf Claussius και η πρόταση αποτελεί μια άλλη διατύπωση του δεύτερου νόμου της θερμοδυναμικής.

Η διατύπωση μας οδηγεί στην ιδέα ότι η «ζεστή» θερμότητα είναι πολυτιμότερη από ισόποση «κρύα» θερμότητα.

Η μηχανική ενέργεια είναι πολυτιμότερη από τη θερμική

Ένας βράχος κατρακυλάει από το βουνό. Σε λίγο έχει φτάσει χαμηλά. Εκεί σταματάει και γνωρίζουμε ότι η θερμοκρασία του αυξήθηκε.

Για το σύστημα βράχος-Γη:

- η **ολική ενέργεια** διατηρήθηκε σταθερή
- η **μηχανική ενέργεια** ελαττώθηκε ενώ αυξήθηκε ισόποσα η **εσωτερική ενέργεια**

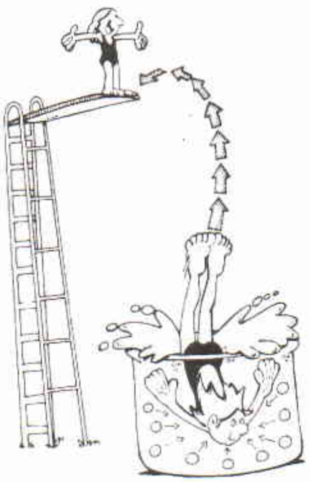
Το φαινόμενο χαρακτηρίζεται *αυθόρμητο*. Μια ποσότητα μηχανικής ενέργειας μετατράπηκε ολόκληρη σε ενέργεια θερμική.

Μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε αυτή τη θερμική ενέργεια για να ξαναπάρουμε τη μηχανική ενέργεια που είχαμε; Μπορεί δηλαδή ο βράχος να ξαναπάει *μόνος του* στο σημείο από όπου ξεκίνησε; Γνωρίζουμε πολύ καλά ότι κάτι τέτοιο δεν μπορεί να συμβεί.

Μήπως θα μπορούσε να γίνει με κάποια μηχανή; Να τρο-

φοδοτήσουμε δηλαδή μια μηχανή με τη θερμική ενέργεια που διαθέτουμε και να πάρουμε μηχανική ενέργεια ισοδύναμη; Η εμπειρία της ατμομηχανής μας δίδαξε ότι αυτό δεν είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί ούτε και με ιδανική μηχανή.

Είναι αναπόφευκτο να οδηγηθούμε σε κάποια σύγκριση ανάμεσα στη μηχανική και τη θερμική ενέργεια. Διαπιστώνουμε ότι η μηχανική ενέργεια υπερτερεί της θερμικής, είναι πιο πολύτιμη:



α) Η φύση επιτρέπει την μετατροπή της μηχανικής ενέργειας εξ ολοκλήρου σε θερμική ενώ εμποδίζει τη θερμική να κάνει το αντίθετο.

β) Η μηχανική ενέργεια μας δίνει ωφέλιμο έργο περισσότερο από μια ισοδύναμη ποσότητα θερμικής ενέργειας.

Ο πρώτος νόμος της θερμοδυναμικής, βέβαια, υποστηρίζει ότι οι **διάφορες μορφές ενέργειας είναι ποσοτικά ισοδύναμες.** Ο δεύτερος συμπληρώνει. **Ποσοτικά ισοδύναμες ναι, αλλά όχι το ίδιο πολύτιμες.**

Σ' αυτό που συνέβη με το βράχο, αλλά και σε κάθε αυθόρμητο φαινόμενο, η φυσική υποστηρίζει ότι **η ολική ενέργεια διατηρείται αλλά και υποβαθμίζεται.** Σε σχέση με τη μηχανική ενέργεια η θερμική θεωρείται ενέργεια κατώτερη, λιγότερο χρήσιμη, ενέργεια υποβαθμισμένη. Αυτό ισχύει και σε σχέση με όλες τις άλλες μορφές εσωτερικής ενέργειας, όπως, λόγου χάριν, η χημική ενέργεια.

Να συνοψίσουμε. Περιγράφοντας τα φαινόμενα από τη σκοπιά του μακρόκοσμου, η θερμοδυναμική διακρίνει τη μεταβιβαζόμενη σ' ένα σύστημα ενέργεια (έργο, θερμότητα) από την ενέργεια την οποία *έχει* ένα σύστημα σε κάποια χρονική στιγμή και υποστηρίζει:

α) Αναφορικά με τη μεταβίβαση ενέργειας

ι) ότι **το έργο είναι πολυτιμότερο από ισόποση θερμότητα**

ιι) ότι **η «ζεστή» θερμότητα είναι πολυτιμότερη από ισόποση «κρύα» θερμότητα.**

β) Αναφορικά με την ενέργεια ενός συστήματος

ότι **η εσωτερική θερμική ενέργεια είναι λιγότερο πολύτιμη σε σχέση με ισόποση μηχανική ενέργεια αλλά και σε σχέση με άλλες μορφές εσωτερικής ενέργειας όπως είναι η χημική ενέργεια.**

Από τη σκοπιά του μικρόκοσμου

Εσωτερική ενέργεια

Έχουμε πει ότι –από τη σκοπιά του μικρόκοσμου– εσωτερική ενέργεια είναι το άθροισμα των κινητικών ενεργειών και των δυναμικών ενεργειών όλων των σωματιδίων του συστήματος.

Αν περιοριστούμε σε φαινόμενα όπως η θέρμανση, οι μεταβολές καταστάσεων, η συμπίεση, η εκτόνωση και οι χημικές αντιδράσεις, τότε οι προσθετέοι της εσωτερικής ενέργειας είναι:

ι) Αυτοί που παριστάνουν **κινητικές ενέργειες.** Αντιστοιχούν σε κινήσεις τυχαίες και άτακτες και σχετίζονται με το μακροσκοπικό μέγεθος θερμοκρασία. Πρόκειται για προσθετέους που αποτελούν το λεγόμενο **ανοργάνωτο** τμήμα της εσωτερικής ενέργειας. Το άθροισμά τους είναι αυτό που λέμε θερμική ενέργεια. Σ' ένα ιδανικό αέριο υπάρχουν μόνο οι προσθετέοι που παριστάνουν κινητικές ενέργειες.

ιι) Αυτοί που παριστάνουν **δυναμικές ενέργειες.** Αντιστοιχούν στις αλληλεπιδράσεις μορίων με μόρια καθώς και με άτομα στο εσωτερικό ενός μορίου. Πρόκειται για προσθετέους που αποτελούν το λεγόμενο **οργανωμένο** τμήμα της εσωτερικής ενέργειας. Το άθροισμά τους είναι αυτό που λέμε χημική ενέργεια.

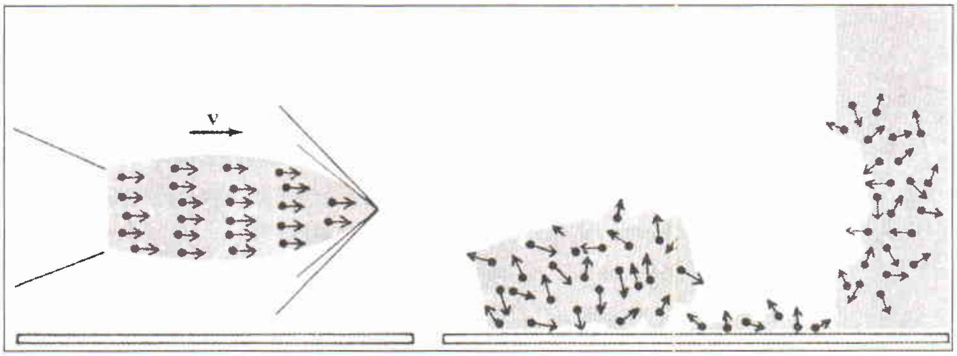
Μηχανική ενέργεια

Η κίνηση ενός αντικειμένου από τη σκοπιά του μακρόκοσμου περιγράφεται και με το μέγεθος κινητική ενέργεια. Καθώς το αντικείμενο εκτελεί, για παράδειγμα, μεταφορική κίνηση, τα

σωματίδια που το συγκροτούν έχουν σε κάθε στιγμή κοινή ταχύτητα και η κινητική τους ενέργειας –σε αντιπαράθεση με εκείνη που αντανακλά την τυχαία και άτακτη θερμική κίνηση– θεωρείται **οργανωμένη.**

Από την οργάνωση στην αταξία

1. Καθώς ένα βλήμα μεγάλης ταχύτητας ενσφηνώνεται σε κάποιο τοίχωμα και η μηχανική του ενέργεια υποβαθμίζεται, μετατρεπόμενη σε ισόποση θερμική, μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι η οργανωμένη κινητική ενέργεια των σωματιδίων του μετατρέπεται σε κινητική ενέργεια ανοργάνωτη.





Αυτό θα μπορούσε να σας συμβεί αν ίσχυε μόνο ο πρώτος νόμος της θερμοδυναμικής.

2. Καθώς κατρακυλάει ο βράχος, η οργανωμένη κινητική ενέργεια των δομικών σωματιδίων του –εν προκειμένω των μορίων του– μετατρέπεται σε ενέργεια θερμική, που σημαίνει πάλι κινητική ενέργεια σωματιδίων, αλλά τώρα πια ανοργάνωτη. Ενώ η ενέργεια ποσοτικά διατηρήθηκε, κάτι άλλαξε. Η «αταξία» μεγάλωσε. Η φύση κατά τις αυθόρμητες διεργασίες της –που αποτελούν και τη συντριπτική πλειοψηφία των γεγονότων του Σύμπαντος– φαίνεται να δείχνει μια προτίμηση. Όσο για το βράχο, ο δεύτερος νόμος της θερμοδυναμικής μας θυμίζει κάτι που το ξέρουμε. Μπορεί να το ξέρουμε αλλά μας το επισημαίνει. Μας λέει λοιπόν ότι είναι αδύνατον τα δομικά σωματίδια του βράχου να οργανωθούν μόνα τους, να αποκτήσουν τις ίδιες κατευθύνσεις ταχύτητας, έτσι που ο βράχος ν' αρχίσει να τρέχει μόνος

του κατά την ανηφοριά. Σύμφωνα με τον πρώτο νόμο αυτό δεν είναι κάτι που απαγορεύεται. Θα είχαμε μια επιτρεπόμενη αύξηση της μηχανικής ενέργειας σε βάρος της θερμικής. Η θερμοκρασία του βράχου θα ελαττωνόταν, αλλά ο βράχος θα ανέβαινε μόνος του. Θα ήταν μια οργάνωση της ενέργειας, μια αυθόρμητη διαδικασία από την αταξία στην οργάνωση. Η φύση όμως δε φαίνεται να συγκινείται από τέτοιες οργανώσεις αυθόρμητες. Οι χιονοστιβάδες μάς παίρνουν από πίσω κατά την ανορθόδοξη κατεύθυνση μόνο σε χαριτωμένα κινηματογραφικά έργα, σε σκίτσα ή σε άσχημα όνειρα.

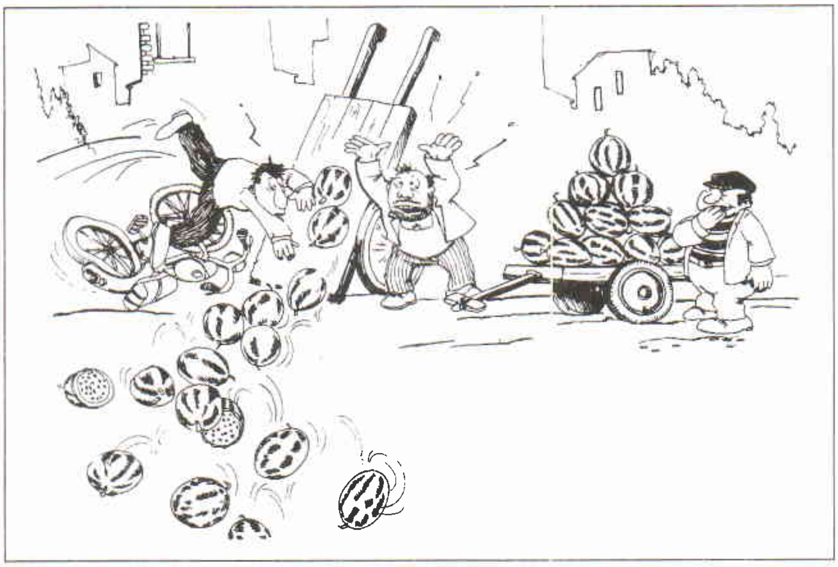
Ταξίδια χωρίς επιστροφή. Σε πολλές διαδικασίες στη φύση υπάρχει μία μόνο κατεύθυνση. Ένα σπίρτο που κάηκε δεν υπάρχει τρόπος να ξαναγίνει σπίρτο. Τα άτομα που το συγκροτούσαν βρίσκονταν σε μια οργανωμένη δομή. Ύστερα από τη «συνάντηση» με τα άτομα του οξυγόνου η ολική μάζα παρέμεινε σταθερή –όπως λέει ο Lavoisier– και η εξέλιξη της ενέργειας πειθάρχησε στον πρώτο νόμο της θερμοδυναμικής. Κάτι όμως έχει αλλάξει αμετάκλητα. Η νέα διάταξη είναι λιγότερο τακτοποιημένη από προηγούμενα, λέει ο δεύτερος νόμος της θερμοδυναμικής. Από μια σχετικά οργανωμένη δομή περάσαμε σε μικρότερη οργάνωση. Ακόμα κι αν μαζέψουμε όλα τα υλικά που προέκυψαν και τα τροφοδοτήσουμε με τη θερμότητα που είχε απελευθερωθεί δεν υπάρχει δρόμος για επιστροφή. Η φύση δεν επιτρέπει τέτοιου είδους επιστροφές. Το σπίρτο δε θα ξαναγίνει σπίρτο ποτέ. Το αυγό που έβρασε δεν μπορεί να ξαναγίνει αυτό που ήταν πριν. Αλλά κι αν οι χημικοί καταφέρουν σε ορισμένες περιπτώσεις να ξανακάνουν τα πράγματα όπως ήταν πριν, η «επιστροφή» θα έχει οπωσδήποτε ανάγκη από κατανάλωση επιπλέον ενέργειας και μάλιστα μορφής «πολύτιμης».

Εντροπία

Η χρησιμότητα και η οργάνωση. Όταν κάηκε το σπίρτο ένα ποσό χρήσιμης - οργανωμένης ενέργειας μετατράπηκε σε ενέρ-

γεια λιγότερο χρήσιμη και ταυτόχρονα ανόργάνωτη. Ας προσέξουμε πως συμβαδίζουν οι δύο έννοιες. Σε σχέση με τη θερμότητα, η χημική ενέργεια των δεσμών είναι περισσότερο χρήσιμη και περισσότερο οργανωμένη.

Η χρησιμότητα μιας ενέργειας βαθμολογείται σύμφωνα με το ποσό του έργου που μπορεί να πάρουμε απ' αυτήν. Η χημική ενέργεια που βρίσκεται αποθηκευμένη στους δεσμούς του οκτανίου της βενζίνης, μπορεί να δώσει περισσότερο έργο από ίση ποσότητα θερμικής ενέργειας που περιέχεται στο ζεστό πεζοδρόμιο ή στο νερό των ωκεανών. **Η σε μακροσκοπικό επίπεδο *χρησιμότητα* αντανακλά τη μικροσκοπική εικόνα της οργάνωσης.** Η μια έννοια ενδιαφέρει τους μηχανικούς και τους μελετητές μιας μακροσκοπικής θεώρησης, η άλλη ενδια-



Η εντροπία. Στα 1865 ο Rudolf Clausius πρότεινε μια καινούρια έννοια, η οποία θα μπορούσε να βαθμολογήσει τη χρησιμότητα της ενέργειας. Το όνομά της ήταν *εντροπία* (γερμανικά entropie). Δημιουργήθηκε από την ελληνική ρίζα εντρέπω. Τα χρόνια που ακολούθησαν, με την ίδια έννοια, έγινε δυνατό να περιγραφεί και η τάξη-αταξία της ύλης από άποψη μικροσκοπική. Όσο μικρότερη εντροπία έχει ένα σώμα τόσο πιο χρήσιμη ενέργεια διαθέτει –σε μακροσκοπικό επίπεδο– αλλά

και τόσο πιο μεγάλη είναι η τάξη, την οποία εμφανίζει σε μικροσκοπικό επίπεδο.

Μόνο τις μεταβολές της εντροπίας μπορούμε να μετρήσουμε. Καθώς κατρακυλάει ο βράχος στην πλαγιά ή και καθώς καίγεται το σπίρτο η εντροπία αυξάνει, μεγαλώνει η αταξία, υποβιβάζεται η χρησιμότητα.

Ας δούμε τώρα συνολικά τι μας διδάσκει ο δεύτερος νόμος της θερμοδυναμικής. Μας λέει ότι στα αυθόρμητα γεγονότα υπάρχει πάντα μια ορισμένη κατεύθυνση. Είναι ένα δρομολόγιο χωρίς επιστροφή.

Η φυσική ροή της θερμότητας είναι μόνο από τα θερμότερα προς τα ψυχρότερα σώματα. Οι άνθρωποι βαδίζουν ανεπίστρεπτα προς τις ρυτίδες και τα γηρατειά, οι στάχτες δεν μπορούν να ξαναγίνουν κούτσουρο. Γενικότερα, τόσο δηλαδή στα αυθόρμητα όσο και στα όχι αυθόρμητα γεγονότα, η Φύση δείχνει μια συνολική προτίμηση στη *μία* κατεύθυνση. Από τη χρήσιμη ενέργεια στη λιγότερο χρήσιμη, από την οργάνωση στην αταξία. Είναι η πορεία προς την αύξηση της εντροπίας του Σύμπαντος.

Το φαινόμενο *ζωή*

Ένα παράφωνο (;) βιολί στη συμφωνία της υποβάθμισης. Από τα χωρίς οργάνωση άτομα στα ζωντανά μόρια κι από κει στα ζωντανά κύτταρα, στις ομάδες κυττάρων κι από κει στα σκουλήκια, στα σπονδυλωτά, στα θηλαστικά, στον άνθρωπο. Μια πορεία προς την οργάνωση. Κάτι σαν «παραφωνία» στη γενική αύξηση εντροπίας του Σύμπαντος. Μια πορεία από το πιθανό προς το απίθανο. Βέβαια στα δισεκατομμύρια χρόνια που χρειάστηκαν για να γίνει αυτό, τρομακτικές ποσότητες ηλιακής ενέργειας «βομβάρδισαν» τον πλανήτη μας.

Ήταν ενέργεια που δημιουργήθηκε από τη μεταβολή της οργανωμένης δομής των πυρηνικών σωματιδίων σε μια δομή οπωσδήποτε μικρότερης οργάνωσης. Η αύξηση, μ' άλλα λόγια, της εντροπίας που συνέβη στον Ήλιο είναι πολύ μεγαλύτερη από οποιαδήποτε ταυτόχρονη ελάττωση εντροπίας

συνέβη στον πλανήτη μας. Στο μεταξύ, καθώς η ζωή κυλάει μέσα στα οικοσυστήματα, μεγάλες ποσότητες υποβαθμισμένων ενεργειών απελευθερώνονται προς το περιβάλλον.

Απόσπασμα από ένα ντοκουμέντο της UNESCO

Ορισμένοι επιστήμονες συνήθιζαν να σκέφτονται ότι η εμφάνιση, η αναπαραγωγή και η ανάπτυξη μιας οργανωμένης κατάστασης στα ζωντανά συστήματα, αποτελούσαν εξαιρέσεις του δεύτερου νόμου της θερμοδυναμικής. Σήμερα δεν πιστεύουμε ότι κάτι τέτοιο είναι αληθινό. Το σωστό είναι ότι ένα ζωντανό σύστημα μπορεί να περάσει από μια οργανωμένη κατάσταση σε μια άλλη ακόμα πιο οργανωμένη, αλλά αυτό συνοδεύεται οπωσδήποτε από κάποια απόδοση ενέργειας στο περιβάλλον του. Η ενέργεια αυτή προέρχεται από το μετασχηματισμό των πολύπλοκων μορίων (γλυκιδίων, λιπιδίων) των τροφών σε μόρια απλούστερα όπως το H_2O και το CO_2.

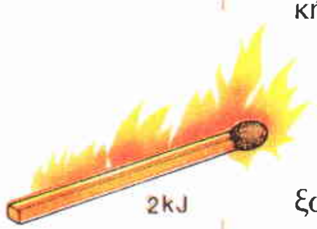
Για να διατηρήσει ένα ανθρώπινο ον σταθερό βάρος στη διάρκεια ενός χρόνου απαιτεί, για παράδειγμα, την υποβάθμιση 500 χιλιογράμμων τροφής και τη διάχυση στο περιβάλλον ενέργειας 2 δισεκατομμυρίων Joules. Η οργάνωση του ανθρώπινου όντος μπορεί να παραμένει η ίδια ή να γίνεται μεγαλύτερη, αλλά η οργάνωση του περιβάλλοντος εκπίπτει πολύ περισσότερο.

Δεν θα μπορούσαμε να καταλάβουμε τίποτε για την οικολογία και για τη μόλυνση του περιβάλλοντος αν πρώτα δε συλλαμβάναμε την ιδέα ότι η διατήρηση της ζωής είναι (σε σχέση με την παραγωγή αταξίας) μια διαδικασία δαπανηρή.

Χημική ενέργεια

Η χημεία μας λέει ότι στο εσωτερικό κάθε μορίου τα άτομα συγκρατούνται σ' αυτό εξ αιτίας ορισμένων μεταξύ τους αλληλεπιδράσεων. Εμείς έχουμε πια μάθει να περιγράφουμε τις αλληλεπιδράσεις α) με δυνάμεις και β) με δυναμική ενέργεια. Εδώ όμως η γλώσσα της ενέργειας είναι πιο αποτελεσματική. Η αλληλεπίδραση ανάμεσα στα άτομα που συγκροτούν το μόριο συνηθίζεται να αποδίδεται με τη λεγόμενη *ενέργεια χημικού δεσμού*.

Κάθε χημική αντίδραση είναι μια διαδικασία, κατά την οποία μία ορισμένη διάταξη των ατόμων (των ιόντων ή των μορίων) μεταβάλλεται και προκύπτει μία διάταξη διαφορετική. Μπορούμε να μεταφράσουμε λέγοντας ότι μεταβάλλονται οι τιμές δυναμικής ενέργειας που περιγράφουν τις διάφορες αλληλεπιδράσεις. Πρόκειται λοιπόν για **μεταβολή της εσωτερικής ενέργειας,** η οποία εκφράζεται με ανταλλαγή ενέργειας ανάμεσα στο σύστημα και το εξωτερικό περιβάλλον του. Η καύση, για παράδειγμα, είναι μια χημική αντίδραση, η οποία χαρακτηρίζεται ως εξώθερμη, γιατί κατά την εξέλιξή της αποδίδεται ενέργεια –ως θερμότητα– από το σύστημα προς το περιβάλλον του.



Με τις γνωστές θερμιδομετρικές διατάξεις μπορούμε να μετράμε και τα ποσά θερμότητας που αποδίδονται από τα διάφορα καύσιμα. Τα καύσιμα δεν έχουν όλα τις ίδιες δυνατότητες. Ένα κιλό λιγνίτη κατά τη καύση του αποδίδει πολύ λιγότερη θερμότητα από ένα κιλό πετρέλαιο.

Η θερμαντική ικανότητα ενός καυσίμου είναι ένα μέγεθος που ποσοτικοποιεί τις διαφορετικές αυτές δυνατότητες. Εκφράζει το ποσό θερμότητας που αποδίδει η καύση μιας ορισμένης μάζας καυσίμου, ορίζεται συνεπώς ως πηλίκο του ποσού θερμότητας που αποδίδεται από ορισμένη μάζα του υλικού προς τη μάζα αυτή. Σε μονάδες kcal/kg η θερμαντική ικανότητα του πετρελαίου είναι 11.300, της βενζίνης 10.500, του λιθάνθρακα 7.500 ενώ του λιγνίτη είναι 3.000-5.000 και του ξύλου 3.000-4.000. Τη θερμαντική ικανότητα των αερίων

τη μετράμε καί σε kcal/lit.

Βραδεία καύση συμβαίνει και στις διάφορες τροφές που εισέρχονται στον οργανισμό μας και μας παρέχει την ενέργεια την αναγκαία για να ζούμε και να εκτελούμε «έργα». Αν κάποιος δεν φάει για δυο μέρες, η ενέργεια εξασφαλίζεται από την καύση σακχάρων και αμύλου που είναι αποθηκευμένα σε διάφορα όργανα, όπως το συκώτι. Αν αυτό παραταθεί, ο οργανισμός αρχίζει να καταφεύγει στις εφεδρείες κυτταρικού λίπους.

Ο ανθρώπινος οργανισμός είναι, λοιπόν, ένας ενεργειακός «μετασχηματιστής». Προσλαμβάνει χημική ενέργεια με ενδιάμεσο τις τροφές. Αυτήν, την μετασχηματίζει σε χημική ενέργεια απαραίτητη για τη σύνθεση των συστατικών του σώματος και σε ηλεκτρική ενέργεια αναγκαία για να ενεργοποιήσει το νευρικό σύστημα και σε μηχανική ενέργεια, που του επιτρέπει την εκτέλεση μηχανικού έργου μέσω των μυών του. Ο μετασχηματισμός των τροφών σε ενέργεια συνιστά αυτό που λέμε *ενεργειακό μεταβολισμό*.

Τροφές	Ενεργειακές τιμές για 100 gr (σε kJ)
κρέας αρνιού	1.040
βοδινό	750
χοιρινό	1.250
πουλερικό	625
τόνος	940
κάβουρας	500
πέστροφα	330
φασόλια ξερά	1.380
φασολάκια	100
πατάτες	375
καρότα	170
πορτοκάλι	180
ροδάκινο	230
αχλάδι	250
γάλα	290
τυρί	1.590
βούτυρο	3.180

Ηλιακή ακτινοβολία

Θα μπορούσαμε να πούμε ότι ο Ήλιος είναι κάτι σαν μητέρα μας και πατέρας μας μαζί. Η ζωή προέρχεται από την ακτινοβολία του Ήλιου, αλλά και διατηρείται χάρις σ' αυτήν. Για να μιλήσουμε γι' αυτό το ζήτημα χρειαζόμαστε πάλι τη γλώσσα της ενέργειας.

Από το ηλιακό φως που ακτινοβολείται στο διάστημα ένα ελάχιστο ποσοστό –κάπου μισό στο εκατομμύριο– φτάνει στην επιφάνεια του πλανήτη Γη. Τα φυτά κρατούν το ένα περίπου εκατοστό από τη σταγόνα αυτής της ενέργειας και το χρησιμοποιούν για να παίξουν το ρόλο τους στο παιχνίδι της ζωής. Η ενέργεια του Ήλιου με τη μεσολάβηση φυτικών και ζωικών κυττάρων γίνεται «ζωή». Στη γνωστή μας ενεργειακή διάλεκτο η ακτινοβόλος ενέργεια του Ήλιου μετατρέπεται σε ενέργεια χημική, η οποία στη συνέχεια μπορεί να απελευθερώνεται επιτρέποντας στο κύτταρο να αναπτύσσεται και να πολλαπλασιάζεται, στις αμυγδαλιές να ανθίζουν, στις πέστροφες να κινούνται στο νερό και στους ανθρώπους να «εργάζονται».

Το παιχνίδι της ζωής παίζεται μέσα από δύο επιβλητικές και πολύπλοκες διαδικασίες. Η μία γίνεται μόνο στα φυτά και λέγεται *φωτοσύνθεση*. Η άλλη εμφανίζεται τόσο στα φυτά όσο και στα ζώα και λέγεται *αναπνοή*.

Κατά τη φωτοσύνθεση τα φυτικά κύτταρα «αιχμαλωτίζουν» το ηλιακό φως και το χρησιμοποιούν για να μετατρέπουν το διοξείδιο του άνθρακα και το νερό σε σημαντικά θρεπτικά συστατικά, όπως είναι η γλυκόζη, αποβάλλοντας ταυτόχρονα και οξυγόνο. Με τα χημικά σύμβολα μπορούμε να γράψουμε:

$$6CO_2 + 6H_2O + \text{ενέργεια} \rightarrow C_6H_{12}0_6 + 6O_2$$

Κατά την αναπνοή τόσο τα φυτικά όσο και τα ζωικά κύτταρα προσλαμβάνουν οξυγόνο και το χρησιμοποιούν για να μετατρέπουν το σάκχαρο των τροφών σε ενέργεια. Μπορούμε να γράψουμε:

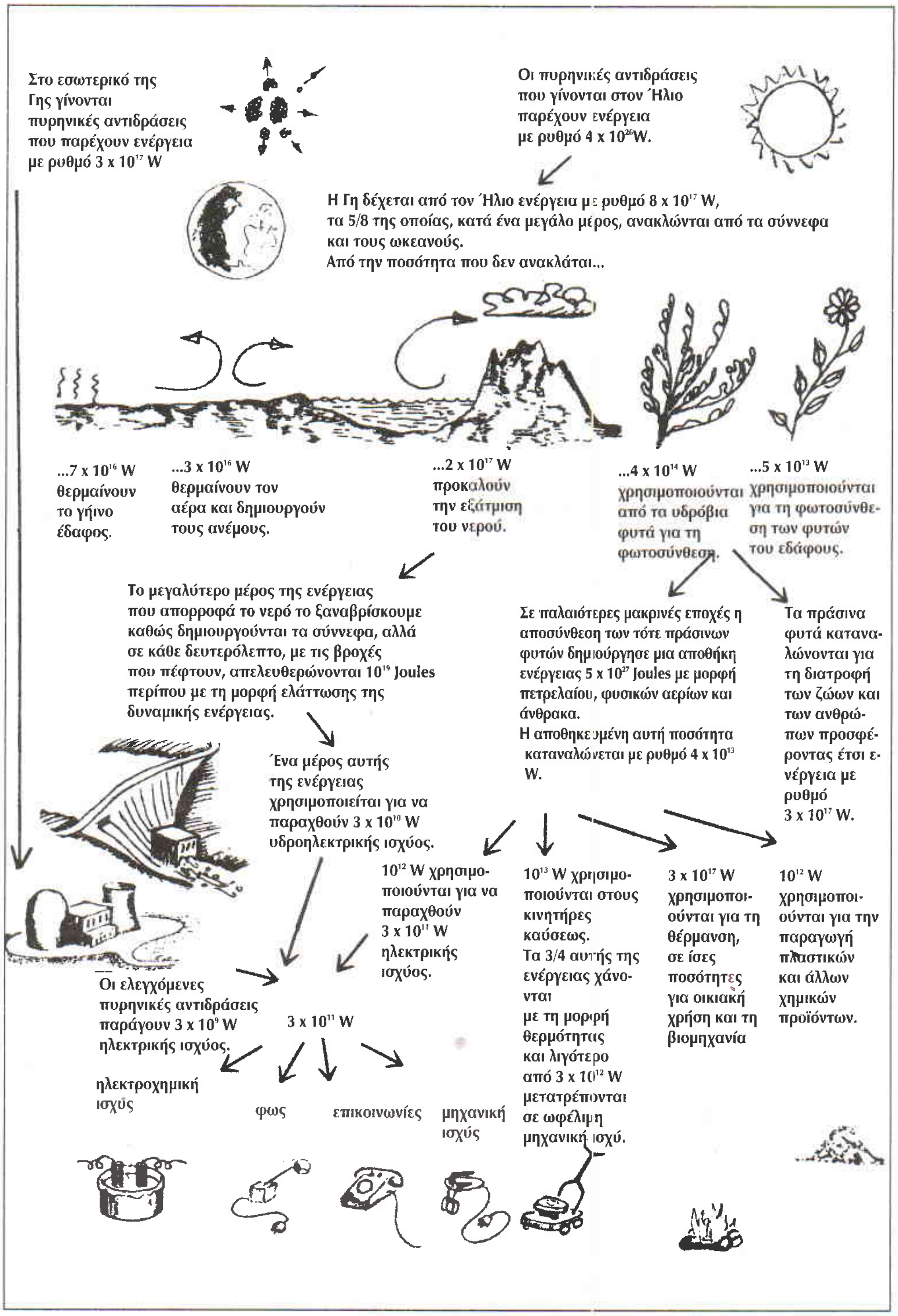
$$C_6H_{12}O_6 + 6O_2 \rightarrow 6CO_2 + 6H_2O + \text{ενέργεια}.$$

Τα υποπροϊόντα της αναπνοής CO_2 και O_2 ξαναγυρίζουν στην ατμόσφαιρα για να ξαναχρησιμοποιηθούν στη φωτοσύνθεση. Ο κύκλος της ζωής συνεχίζεται ακατάπαυστα.

Πέρα όμως από το ρόλο που διαδραματίζει στον κύκλο της ζωής, ο Ήλιος αποτελεί την «πηγή» των πιο σημαντικών ενεργειακών μετασχηματισμών, που συμβαίνουν πάνω στον πλανήτη μας.



Παράσταση του Ήλιου, πάνω σε λιθόστρωτο. Λόφος Φιλοπάππου, Αθήνα.


Στο εσωτερικό της Γης γίνονται πυρηνικές αντιδράσεις που παρέχουν ενέργεια με ρυθμό 3 x 10^{17} W
Οι πυρηνικές αντιδράσεις που γίνονται στον Ήλιο παρέχουν ενέργεια με ρυθμό 4 x 10^{26}W.
Η Γη δέχεται από τον Ήλιο ενέργεια με ρυθμό 8 x 10^{17} W, τα 5/8 της οποίας, κατά ένα μεγάλο μέρος, ανακλώνται από τα σύννεφα και τους ωκεανούς.
Από την ποσότητα που δεν ανακλάται...
...7 x 10^{16} W θερμαίνουν το γήινο έδαφος.
...3 x 10^{16} W θερμαίνουν τον αέρα και δημιουργούν τους ανέμους.
...2 x 10^{17} W προκαλούν την εξάτμιση του νερού.
...4 x 10^{14} W χρησιμοποιούνται από τα υδρόβια φυτά για τη φωτοσύνθεση.
...5 x 10^{13} W χρησιμοποιούνται για τη φωτοσύνθεση των φυτών του εδάφους.
Το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας που απορροφά το νερό το ξαναβρίσκουμε καθώς δημιουργούνται τα σύννεφα, αλλά σε κάθε δευτερόλεπτο, με τις βροχές που πέφτουν, απελευθερώνονται 10^{19} Joules περίπου με τη μορφή ελάττωσης της δυναμικής ενέργειας.
Σε παλαιότερες μακρινές εποχές η αποσύνθεση των τότε πράσινων φυτών δημιούργησε μια αποθήκη ενέργειας 5 x 10^{27} Joules με μορφή πετρελαίου, φυσικών αερίων και άνθρακα.
Η αποθηκευμένη αυτή ποσότητα καταναλώνεται με ρυθμό 4 x 10^{13} W.
Τα πράσινα φυτά καταναλώνονται για τη διατροφή των ζώων και των ανθρώπων προσφέροντας έτσι ενέργεια με ρυθμό 3 x 10^{17} W.
Ένα μέρος αυτής της ενέργειας χρησιμοποιείται για να παραχθούν 3 x 10^{10} W υδροηλεκτρικής ισχύος.
10^{12} W χρησιμοποιούνται για να παραχθούν 3 x 10^{11} W ηλεκτρικής ισχύος.
10^{13} W χρησιμοποιούνται στους κινητήρες καύσεως.
Τα 3/4 αυτής της ενέργειας χάνονται με τη μορφή θερμότητας και λιγότερο από 3 x 10^{12} W μετατρέπονται σε ωφέλιμη μηχανική ισχύ.
3 x 10^{17} W χρησιμοποιούνται για τη θέρμανση, σε ίσες ποσότητες για οικιακή χρήση και τη βιομηχανία
10^{12} W χρησιμοποιούνται για την παραγωγή πλαστικών και άλλων χημικών προϊόντων.
Οι ελεγχόμενες πυρηνικές αντιδράσεις παράγουν 3 x 10^{9} W ηλεκτρικής ισχύος.
3 x 10^{11} W
ηλεκτροχημική ισχύς
φως
επικοινωνίες
μηχανική ισχύς

Ερωτήσεις και προβλήματα

(Αν σε κάποιο πρόβλημα χρειαστείτε το μέτρο της βαρυτικής επιτάχυνσης να το θεωρήσετε γνωστό και ίσο με 10 m/s^2. Τις ειδικές θερμότητες που θα χρειαστείτε να τις αναζητήσετε στους σχετικούς πίνακες του βιβλίου).



5.1. Το πρώτο θερμόμετρο κατασκευάστηκε από τον Γαλιλαίο. Που βασιζόταν η λειτουργία του; Τι χρειαζόταν να επινοηθεί ακόμα για να δημιουργηθεί το θερμόμετρο;

5.2. Ποια ήταν η αρχική πρόταση του Κελσίου για μια θερμοκρασιακή κλίμακα; Ποια πρόταση επεκράτησε εννιά χρόνια αργότερα;

5.3. Γιατί χρησιμοποιείται υδράργυρος για την κατασκευή θερμομέτρων;

5.4. Η ισότητα των θερμοκρασιών δύο σωμάτων μπορεί να διαπιστωθεί με ένα θερμόμετρο. Σε ποια παραδοχή βασίζεται η διαπίστωση αυτή;

5.5. Ποια είναι η σχέση των ενδείξεων των θερμοκρασιακών κλιμάκων Κελσίου και Kelvin; Ποια είναι η σχέση των θερμοκρασιακών μεταβολών;

5.6. Ποια είναι η αιτία της ροής θερμότητας; Ποια είναι η κατεύθυνση της ροής;

5.7. Πώς διατυπώνεται ο θεμελιώδης νόμος της θερμιδομετρίας;

5.8. Το νερό εμφανίζει μια από τις μεγαλύτερες τιμές ειδικής θερμότητας ανάμεσα στα διάφορα υλικά. Ποια είναι η συνέπεια αυτού του γεγονότος για τη ζωή στον πλανήτη;

5.9. Τι σημαίνουν οι όροι α) κανονικό σημείο βρασμού β) θερμότητα εξαέρωσης γ) κανονικό σημείο τήξης δ) θερμότητα τήξης.

5.10. Από τι εξαρτάται ι) το σημείο βρασμού ιι) το σημείο τήξης;

5.11. Περιγράψτε τρία φαινόμενα κατά τα οποία ένα σώμα θερμαίνεται χωρίς απορρόφηση θερμότητας.

5.12. Ποιο είναι το κοινό στοιχείο ανάμεσα στις έννοιες έργο και θερμότητα; Σε τι διαφέρουν;

5.13. Να περιγράψετε συνοπτικά α) πως ο κατέληξε ο Mayer στην αρχή διατήρησης της ενέργειας β) πως κατέληξε ο Joule στην ίδια αρχή.

5.14. Η εξίσωση $\Delta E = Q + W$ αναφέρεται στον πρώτο νόμο της θερμοδυναμικής. Τι παριστάνει κάθε σύμβολο;

5.15. Πώς ορίζεται η εσωτερική ενέργεια ενός σώματος από τη σκοπιά του μικρόκοσμου;

5.16. Ποια είναι η σχέση της θερμοκρασίας ενός ιδανικού αερίου με την κίνηση των μορίων του;

5.17. Τι λέγεται ιδανικό αέριο από τη σκοπιά του μικρόκοσμου;

5.18. Πού βασίζεται η θερμοδυναμική όταν υποστηρίζει ότι έργο 100 τζάουλ είναι πολυτιμότερο από θερμότητα 100 τζάουλ;

5.19. Υπό ποια έννοια θερμότητα 100

τζάουλ μεταβιβαζόμενη υπό ορισμένη θερμοκρασία είναι πολυτιμότερη από θερμότητα 100 τζάουλ η οποία μεταβιβάζεται υπό χαμηλότερη θερμοκρασία;

5.20. Περιγράψτε δύο φαινόμενα τέτοια ώστε στο ένα από αυτά μια ποσότητα μηχανικής ενέργειας υποβαθμίζεται σε (εσωτερική) θερμική ενέργεια και στο άλλο μια ποσότητα (εσωτερικής) χημικής ενέργειας να υποβαθμίζεται σε (εσωτερική) θερμική ενέργεια;

5.21. Καθώς ένα βλήμα ενσφηνώνεται σε κάποιο τοίχωμα η μηχανική του ενέργεια υποβαθμίζεται. Τι συμβαίνει από τη σκοπιά του μικρόκοσμου;

5.22. Τι ακριβώς αλλάζει, από τη σκοπιά του μακρόκοσμου καθώς μια ποσότητα ενέργειας υποβαθμίζεται; Τι αλλάζει από τη σκοπιά του μικρόκοσμου;



Να αναρωτηθούμε...

5.23. Σας ζητούμε να βάλετε τα παρακάτω γεγονότα σε χρονολογική σειρά.
α) Ο Άντερς Κέλσιους προτείνει την εκατονταβάθμια κλίμακα θερμοκρασιών.
β) Ο Γαλιλαίος κατασκευάζει το πρώτο θερμοσκόπιο.
γ) Ο λόρδος Κέλβιν προτείνει την απόλυτη κλίμακα θερμοκρασιών.
δ) Ο Φαρενάιτ χρησιμοποιεί υδράργυρο για την κατασκευή θερμομέτρου.

5.24. Ένα θερμόμετρο δείχνει 27° C
α) 27° C είναι η θερμοκρασία του
β) 27° C είναι η θερμοκρασία του σώματος με το οποίο βρίσκεται σε θερμική ισορροπία
γ) έχει μικρότερη θερμοκρασία από ένα σώμα θερμοκρασίας 200 K
Με ποιο από αυτά διαφωνείτε;

5.25. Να συμπληρώσετε τα κενά του κειμένου επιλέγοντας από τα εξής:
• ΕΙΔΙΚΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑ • ΘΕΡΜΟΤΗΤΑ • 41860J • $J\,kg^{-1}K^{-1}$ • $J\,kg^{-1}$ • 4186 J • ΘΕΡΜΟΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑ • 4586 $J\,K^{-1}$ • 45860 $J\,K^{-1}$ • ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ • $J\,K^{-1}$ • 4586 J

Η .... ενός δοχείου είναι 400 .... Το δοχείο περιέχει νερό του οποίου η .... είναι 4186 .... Η μάζα του νερού είναι 1 kg. Η θερμοχωρητικότητα του συστήματος είναι .... Για να αυξηθεί η .... του συστήματος κατά 1 °C πρέπει να απορροφήσει .... ίση με ....

5.26. Σε 1 kg νερού μεταβιβάζεται θερμότητα 4186 τζάουλ και η θερμοκρασία του νερού αυξάνει κατά 1 K. Η πίεση είναι ίση με μια ατμόσφαιρα. Τι από τα παρακάτω δεν είναι δυνατόν να συμβαίνει;
Η αρχική θερμοκρασία του νερού μπορεί να ήταν
α) 0° C β) 100° C γ) 20° C

5.27. Βρίσκετε ότι ο καφές σας είναι πολύ ζεστός για να τον πιείτε. Διαθέτετε παγάκια από το ψυγείο. Για να κρυώσει ο καφές τι θα ήταν καλύτερο, να προσθέσετε ένα παγάκι ή νερό από το παγάκι;

5.28. Να συμπληρώσετε τα κενά του κειμένου επιλέγοντας από τα εξής:
• ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ • ΨΥΧΟΣ • ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ • ΑΥΞΗΣΗ • ΤΗΞΗΣ • ΒΡΑΣΜΟΥ

Η απορρόφηση .... από ένα στερεό σώμα μπορεί να προκαλέσει .... της .... Μπορεί όμως να μην προκαλέσει τέτοια μεταβολή εφόσον το στερεό σώμα βρίσκεται στη θερμοκρασία ....

5.29. Με ποια από τα παρακάτω συμφωνείτε;

α) Η θέρμανση ενός σώματος μπορεί να γίνει μόνο με απορρόφηση θερμότητας

β) Η θερμότητα είναι μεταβιβαζόμενη ενέργεια

γ) Η απορρόφηση θερμότητας από ένα σώμα έχει πάντοτε ως αποτέλεσμα την αύξηση της θερμοκρασίας του.

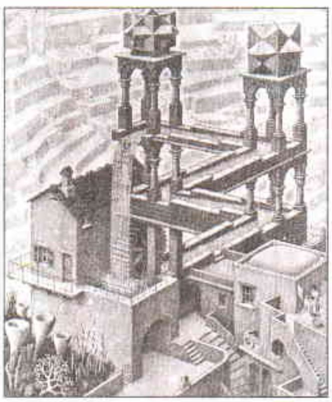
δ) Η θερμότητα ενός σώματος μπορεί να αυξηθεί

ε) Η θέρμανση ενός σώματος μπορεί να γίνει και με έργο

στ) Η θερμότητα μεταβιβάζεται αυθόρμητα από ένα σώμα προς ένα άλλο του οποίου η θερμοκρασία είναι μικρότερη

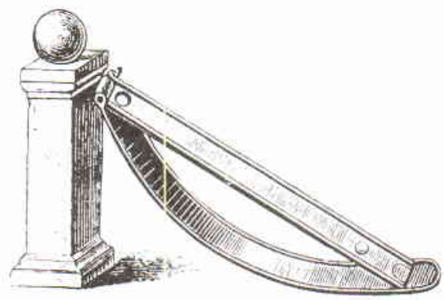
ζ) Το έργο και η θερμότητα έχουν την ίδια μονάδα μετρήσεως.

5.30. Είναι σωστό να λέμε ότι το Joule είναι α) μονάδα θερμότητας β) μονάδα ισχύος γ) μονάδα ενέργειας δ) μονάδα θερμοκρασίας.



5.31. Σ' αυτόν τον πίνακα, ο ζωγράφος M.C.Escher δείχνει να αμφισβητεί τη διατήρηση της ενέργειας; Δικαιολογήστε την απάντησή σας.

5.32. Η αρχή της διατήρησης της ενέργειας μας διαβεβαιώνει ότι είναι μάταιο να ψάχνουμε για μια μηχανή που θα μας προσφέρει ενέργεια περισσότερη από αυτήν που της προσφέρουμε. Υπήρξαν βέβαια πολλοί άνθρωποι που είτε οραματίστηκαν είτε και δοκίμασαν να κατασκευάσουν μια τέτοια μηχανή, το αεικίνητο πρώτου είδους όπως λέγεται. Μια από τις προσπάθειες των κυνηγών της αέναης κίνησης είναι και η διάταξη του σχήματος. Ο μεγάλος μαγνήτης Α έλκοντας τη σιδερένια μπίλια, την ανεβάζει στο κεκλιμένο επίπεδο. Η μπίλια φτάνει στην τρύπα και μέσα απ' αυτήν πέφτει στο έλασμα, κυλάει, βγαίνει από το άνοιγμα και η κίνηση συνεχίζεται αδιόκοπα. Η σύλληψη φαίνεται λογική. Μπορείτε να πείτε γιατί όμως δεν πραγματοποιείται;



5.33. Υπάρχουν πρότυπα για το χρόνο, το μήκος και τη μάζα. Για την ενέργεια δεν έχουμε ανάγκη από πρότυπο. Παρόλα αυτά, ας υποθέσουμε ότι κάποιος σας ζητάει να προσφέρετε ενέργεια ενός Joule. Περιγράψτε πώς θα μπορούσατε να κάνετε κάτι τέτοιο.

5.34. Κατά τη διάρκεια της συμπίεσης κάποιου ιδανικού αερίου η εσωτερική του ενέργεια διατηρείται σταθερή ενώ στο αέριο μεταβιβάζεται ενέργεια ως έργο 20 J.



Με ποιο από τα παρακάτω συμφωνείτε;

α) Το αέριο μεταβιβάζει θερμότητα στο περιβάλλον του ίση με 20 J.

β) Η θερμοκρασία του αερίου μεγαλώνει συνεχώς.

γ) Το έργο του σώματος μεταβάλλεται.

5.35. Υποθέτουμε ότι σε μια πειραματική

διαδικασία με τη συσκευή του Joule κατά την πτώση των βαριδιών η δυναμική ενέργεια του συστήματος βαρίδια-Γη ελαττώνεται κατά 3 J.

Ποιες από τις παρακάτω διατυπώσεις θεωρείτε σωστές;

α) Στα πτερύγια μεταβιβάζεται ενέργεια με μορφή έργου 3 J.

β) Το έργο των πτερυγίων μεγάλωσε κατά 3 J.

γ) Η εσωτερική θερμική ενέργεια του νερού αυξάνει κατά 3 J.

5.36. Ποιο σώμα κατέχει μεγαλύτερο ποσό θερμικής ενέργειας, ένα παγόβουνο ή ένα φλιτζάνι με ζεστό καφέ; Δικαιολογήστε την απάντηση.

5.37. Μια μαθήτρια σηκώνει ψηλά τα χέρια της κι ύστερα τα ξαναφέρνει στην αρχική τους θέση.

α) Η αρχική μηχανική ενέργεια της μαθήτριας είναι ίση με την τελική.

β) Η θερμότητα της μαθήτριας μεγάλωσε.

γ) Μια ποσότητα ενέργειας υποβιβάστηκε.

δ) Μια ποσότητα (εσωτερικής) χημικής ενέργειας μετετράπη σε (εσωτερική) θερμική ενέργεια.

Ποια από τις παραπάνω διατυπώσεις δεν θεωρείτε σωστές;

5.38. Καθώς καίγεται ένα δένδρο

α) Μια ποσότητα ενέργειας υποβαθμίζεται

β) Μια ποσότητα χημικής ενέργειας μετατρέπεται σε θερμική ενέργεια

γ) Η εντροπία ελαττώνεται

δ) Μια ορισμένη διάταξη ατόμων μεταβάλλεται.

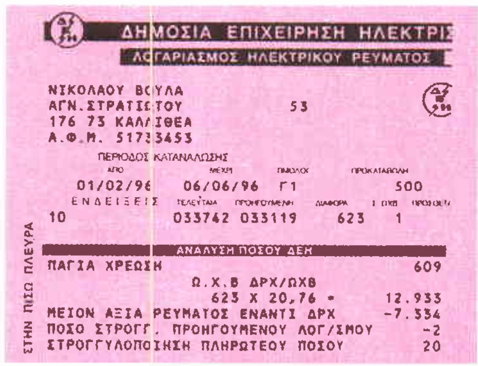
Με ποια από αυτά συμφωνείτε;

5.39. Να επιλέξετε από τις παρακάτω λέξεις ή φράσεις και να συμπληρώσετε τα κενά:

• ΥΠΟΒΑΘΜΙΖΕΤΑΙ • ΜΕΓΑΛΩΝΕΙ • ΑΝΗΦΟΡΙΖΕΙ ΣΕ • ΜΙΚΡΟΚΟΣΜΟΥ • ΚΙΝΗΤΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ • ΚΑΤΗΦΟΡΙΖΕΙ ΑΠΟ • ΕΝΤΡΟΠΙΑ • ΑΥΞΑΝΕΤΑΙ • ΘΕΡΜΟΤΗΤΑ • ΕΝΤΡΟΠΙΑ

Καθώς ένας βράχος .... μια βουνοπλαγιά η δυναμική ενέργεια του συστήματος βράχος-Γη διαρκώς ελαττώνεται, η μηχανική ενέργεια .... η εσωτερική θερμική ενέργεια .... και .... αυξάνεται. Από τη σκοπιά του .... η οργανωμένη .... μετατρέπεται σε κινητική ενέργεια ανοργάνωτη και η αταξία ....

5.40. Η ενέργεια που αγοράζουμε για το σώμα μας, για το σπίτι μας, για το αυτοκίνητό μας ή το μηχανάκι μας, είναι κυρίως ενέργεια είτε χημική είτε ηλεκτρική. Περιγράψτε πόσες φορές και κάτω από ποιες μορφές «αγοράσατε» ενέργεια κατά τη διάρκεια μιας ημέρας. Μπορείτε να συγκρίνετε την αξία ενός Joule που αγοράζουμε από τη ΔΕΗ και ενός Joule που αγοράζουμε ως βενζίνη από το πρατήριο; Η θερμαντική ικανότητα της βενζίνης είναι 30.300 kJ/l.


ΔΗΜΟΣΙΑ ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΣ
ΛΟΓΑΡΙΑΣΜΟΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΡΕΥΜΑΤΟΣ
ΝΙΚΟΛΑΟΥ ΒΟΥΛΑ
ΑΓΝ.ΣΤΡΑΤΙΩΤΟΥ 53
176 73 ΚΑΛΛΙΘΕΑ
Α.Φ.Μ. 51733453
ΠΕΡΙΟΔΟΣ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ
ΑΠΟ 01/02/96 ΜΕΧΡΙ 06/06/96 Γ1 ΠΡΟΚΑΤΑΒΟΛΗ 500
ΕΝΔΕΙΞΕΙΣ 10 ΤΕΛΕΥΤΑΙΑ 033742 ΠΡΟΗΓΟΥΜΕΝΗ 033119 ΔΙΑΦΟΡΑ 623 1
ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΟΣΟΥ ΔΕΗ
ΠΑΓΙΑ ΧΡΕΩΣΗ 609
Ω.Χ.Β ΔΡΧ/ΩΧΒ
623 Χ 20,76 = 12.933
ΜΕΙΟΝ ΑΞΙΑ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΕΝΑΝΤΙ ΔΡΧ -7.334
ΠΟΣΟ ΣΤΡΟΓΓ. ΠΡΟΗΓΟΥΜΕΝΟΥ ΛΟΓ/ΣΜΟΥ -2
ΣΤΡΟΓΓΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΠΛΗΡΩΤΕΟΥ ΠΟΣΟΥ 20
ΣΤΗΝ ΠΙΣΩ ΠΛΕΥΡΑ

5.41. Περιγράψτε τις ενεργειακές μεταβολές που παρουσιάζονται σε καθένα από τα παρακάτω γεγονότα.

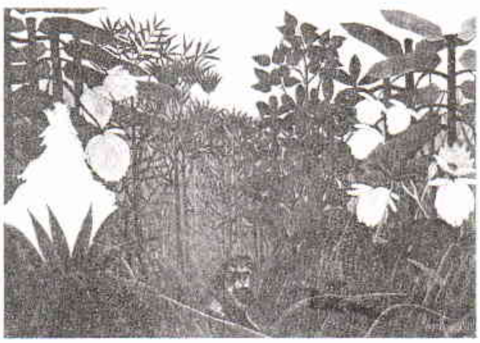
α) Ένας σάκκος με άμμο κρεμασμένος με σκοινί από το κλαδί ενός δένδρου, είναι ακίνητος. Σε κάποια στιγμή ένα βλήμα όπλου ενσφηνώνεται στο εσωτερικό του κι ο σάκκος αρχίζει να ταλαντεύεται.

β) Το νερό χύνεται με ορμή πάνω στα

πτερύγια του υδροστροβίλου. Αυτός συνδέεται με ηλεκτρική γεννήτρια, η οποία τροφοδοτεί ηλεκτρικούς λαμπτήρες πυρακτώσεως.
γ) Η ζωή πάνω στη Γη διατηρείται χάρη στις πυρηνικές αντιδράσεις που γίνονται στον Ήλιο.
δ) Ύστερα από ένα καλό γεύμα, δύο φίλοι παίζουν μια παρτίδα πινγκ-πονγκ.

5.42. Καμιά άλλη έννοια της φυσικής δεν έχει τόσο μεγάλη σχέση με την οικονομία όσο η ενέργεια. Εξηγήστε την παρακάτω ιδέα: Θα μπορούσαμε να έχουμε ως μονάδα ενέργειας αντί για το ένα τζάουλ τη μία δραχμή.

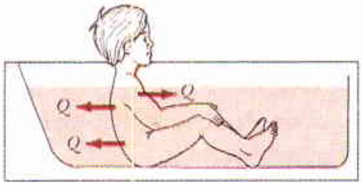
5.43. Εξηγήστε τη διατύπωση: *Το λιοντάρι τρέφεται από το φως του ήλιου.*





Να λύσουμε προβλήματα

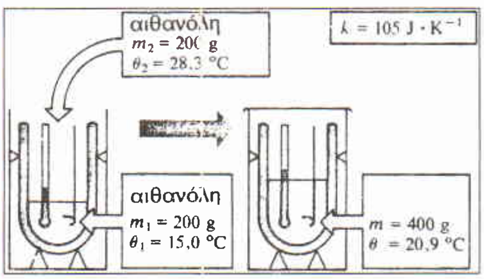
5.44. Η θερμοκρασία ενός μαθητή είναι 310 K. Πόσο δείχνει το θερμόμετρο; Πόση είναι η θερμοκρασία του αέρα (σε K) όταν το θερμόμετρο δείχνει 6 βαθμούς κάτω από το μηδέν; Κατά πόσο (σε K) μεταβάλλεται η θερμοκρασία του νερού αν θερμανθεί από 22°C σε 40°C;



5.45. Το παιδί έχει «τριανταεννιά και ένα» πυρετό. Για να πέσει ο πυρετός το βάζουμε στη μπανιέρα με κρύο νερό. Πόση θερμότητα πρέπει να αποβάλλει το σώμα του ώστε η θερμοκρασία του να κατέβει στους 37°C; Η μάζα του είναι 30 kg. Για την ειδική θερμότητα του ανθρώπινου σώματος, ανατρέξτε στο σχετικό πίνακα.

5.46. Πόσα τζάουλ θερμότητας πρέπει να μεταβιβάσουμε σ' ένα αντικείμενο 200 γραμμαρίων για να αυξηθεί η θερμοκρασία του από 25°C σε 40°C αν το αντικείμενο είναι:
α) από τσιμέντο β) από σίδηρο γ) από μόλυβδο
Αναζητήστε τις ειδικές θερμότητες των υλικών από τον σχετικό πίνακα.

5.47. Μέσα σ' ένα θερμιδόμετρο αλουμινίου, μάζας 80 g, περιέχονται 200 g νερού 20°C. Στη συνέχεια βυθίζονται 80 g σιδήρου 50°C και 100 g χαλκού 70°C. Ποια θα είναι η θερμοκρασία ισορροπίας; Βρείτε τις ειδικές θερμότητες των μετάλλων από τους σχετικούς πίνακες.



5.48. Στο σχήμα παριστάνεται μια διαδικασία για τη μέτρηση της ειδικής θερμότητας της αιθανόλης. Διατυπώστε το πρόβλημα και υπολογίστε την ειδική θερμότητα της αιθανόλης.

5.49. Μέσα σ' ένα θερμιδόμετρο θερμοχωρητικότητας $k = 100\ JK^{-1}$ περιέχονται 300 g νερού σε 20° C. Βυθίζομε στο νερό ένα κομμάτι μέταλλο μάζας 34,7 g και θερμοκρασίας 100° C, του οποίου θέλουμε να υπολογίσουμε τη θερμοχωρητικότητα k'. Η θερμοκρασία ισορροπίας είναι 21,8°C. Ποια θα είναι η τιμή k';

5.50. Υπολογίστε την τελική θερμοκρασία ενός σώματος 500 γραμμαρίων αν απορροφήσει θερμότητα 3000 J, εφόσον α) είναι χάλκινο β) είναι πάγος θερμοκρασίας 0°C γ) είναι ποσότητα νερού θερμοκρασίας 99° C δ) είναι ποσότητα νερού θερμοκρασίας 20° C.

5.51. Ένα παγάκι 20 γραμμαρίων επιπλέει σε 100 γραμμάρια νερού. Στο σύστημα μεταβιβάζεται θερμότητα. Ποια θα είναι η τελική θερμοκρασία του συστήματος αν η μεταβιβαζόμενη θερμότητα είναι α) 6000 J β) 10000 J;

5.52. Ένα σώμα βρίσκεται στο κανονικό σημείο τήξης και απορροφά 2000 J. Ποια ποσότητα θα τακεί αν το αντικείμενο είναι ένα κομμάτι α) χαλκού β) μολύβδου γ) πάγου; Αναζητήστε την τιμή της θερμότητας τήξης κάθε υλικού στο βιβλίο.

5.53. Πήραμε το δοχείο του θερμιδομέτρου, το ζυγίσαμε άδειο και βρήκαμε ότι η μάζα του είναι m = 1,1 kg. Βάλαμε μέσα στο δοχείο ένα κομμάτι πάγου θερμοκρασίας 0° C, και τοποθετήσαμε το σύστημα πάνω σε πηγή σταθερής θερμικής παροχής. Μ' ένα χρονόμετρο παρατηρήσαμε ότι σε χρόνο t_1=200s είχε λιώσει όλος ο πάγος, ενώ στα υπόλοιπα 6min (t_2 = 360s) η θερμοκρασία του νερού είχε φθάσει τους 60°C. Η μάζα του πάγου και του νερού που προέκυψε ήταν m_1 = 90 g. Η ειδική θερμότητα του υλικού του δοχείου ήταν c_1 = 460 J/kgK.
Σας ζητούμε να υπολογίσετε τη θερμότητα τήξης του πάγου.

5.54. Ο Joule είχε τέτοιο ζήλο για την έρευνα ώστε ακόμα και στο γαμήλιο ταξίδι του στην Ελβετία είχε πάρει μαζί του ένα θερμόμετρο.



Ο λόρδος Kelvin διηγείται ότι κατά τη διάρκεια αυτών των διακοπών, τον βρήκε να μετράει τη θερμοκρασία του νερού στην κορυφή και στη βάση ενός μεγάλου καταρράκτη μετά την πρόσκρουσή του στο έδαφος. Σας ζητούμε να υπολογίσετε τη θερμοκρασιακή διαφορά που παρουσίαζε το νερό θεωρώντας ότι ο καταρράκτης είχε ύψος 50 μέτρων.
(Σημείωση: Όταν η εσωτερική ενέργεια μεταβάλλεται υπό σταθερό όγκο και αυξάνει η θερμοκρασία του σώματος, η αύξηση της εσωτερικής ενέργειας είναι ίση με τη θερμότητα που θα έπρεπε να απορροφήσει το σώμα ώστε να παρουσιάσει την ίδια αύξηση της θερμοκρασίας).

5.55. Ένα βορύ βότσαλο μάζας 700 γραμμαρίων αφήνεται από ύψος 2 μέτρων, πέ-

φτει στην άμμο και ακινητοποιείται. Κατά πόσο αυξάνεται η εσωτερική θερμική ενέργεια του συστήματος;

5.56. Κατά τη συμπίεση ενός ιδανικού αερίου μεταβιβάζεται σ' αυτό ενέργεια υπό μορφή έργου 600 J και το αέριο αποδίδει θερμότητα 350 J. Να υπολογίσετε τη μεταβολή της εσωτερικής θερμικής ενέργειας του αερίου.

5.57. Κατά τη θέρμανση ενός ιδανικού αερίου υπό σταθερή πίεση – μέσα σε δοχείο με έμβολο – μεταβιβάζεται θερμότητα 500 J, η εσωτερική ενέργεια του αερίου αυξάνεται κατά 300 J ενώ το αέριο ασκεί στο έμβολο σταθερή δύναμη 2000 N. Κατά πόσο μετατοπίζεται το έμβολο;

5.58. Όταν η διατροφή ενός ανθρώπου του προσδίδει λιγότερη ενέργεια από αυτή που καταναλώνει, ο οργανισμός προσφεύγει στα αποθέματα κυτταρικού λίπους. Η καύση ενός γραμμαρίου λίπους αποδίδει 9,5 μεγάλες θερμίδες (9.500 cal ή 40.000 περίπου Joule).
Ας υποθέσουμε ότι με ένα κανονικό διαιτολόγιο 4.000 μεγάλων θερμίδων την ημέρα, το βάρος σας παραμένει σταθερό. Αν ελαττώσετε το φαγητό ώστε να παίρνετε 3.000 μεγάλες θερμίδες την ημέρα, διατηρώντας την ίδια δραστηριότητα, σε πόσο χρόνο θα χάσετε 2 κιλά;

5.59. Για να παράγουμε ένα τόνο καλαμπόκι χρειάζεται: α) Ενέργεια $E_1 = 10^9$ J για την παραγωγή και τη λειτουργία των γεωργικών μηχανών. β) Ενέργεια $E_2 = 5 \cdot 10^{10}$ J για παραγωγή και μεταφορά λιπασμάτων καθώς και για τη συγκομιδή και μεταφορά του προϊόντος στον καταναλωτή γ) Ενέργεια $E_3 = 2 \cdot 10^{11}$ J την οποία παίρνει το φυτό υπό μορφή ηλιακής ακτινοβολίας. Ένα κοτόπουλο, από τη γέννησή του μέχρι να γίνει 1 kg, έχει καταναλώσει 5 kg καλαμπόκι. Υπολογίστε το ενεργειακό «κόστος» που έχει επενδυθεί i) σε 100 g κοτόπουλο ii) σε 100 g καλαμπόκι, παίρνοντας υπόψη α) μόνο τις ανανεώσιμες μορφές ενέργειας β) όλες τις μορφές ενέργειας. Εξηγήστε γιατί οι οικολόγοι θεωρούν παράλογη την υπερκατανάλωση κρέατος στις πλούσιες χώρες.

5.60. Ένα μικρό αυτοκίνητο μάζας 750 kg καίει 1 λίτρο βενζίνη στα 14 km, όταν κινείται σε οριζόντιο δρόμο με σταθερή ταχύτητα 65 km/h. Μια ακόμη δοκιμή έδειξε ότι, όταν βάλουμε «νεκρό», το αυτοκίνητο επιβραδύνεται από 80 km/h σε 50 km/h μέσα σε 15 δευτερόλεπτα. Υπολογίστε την ωφέλιμη ισχύ και την απόδοση του αυτοκινήτου. Η θερμαντική ικανότητα της βενζίνης είναι $3{,}08 \cdot 10^7$ J/l.

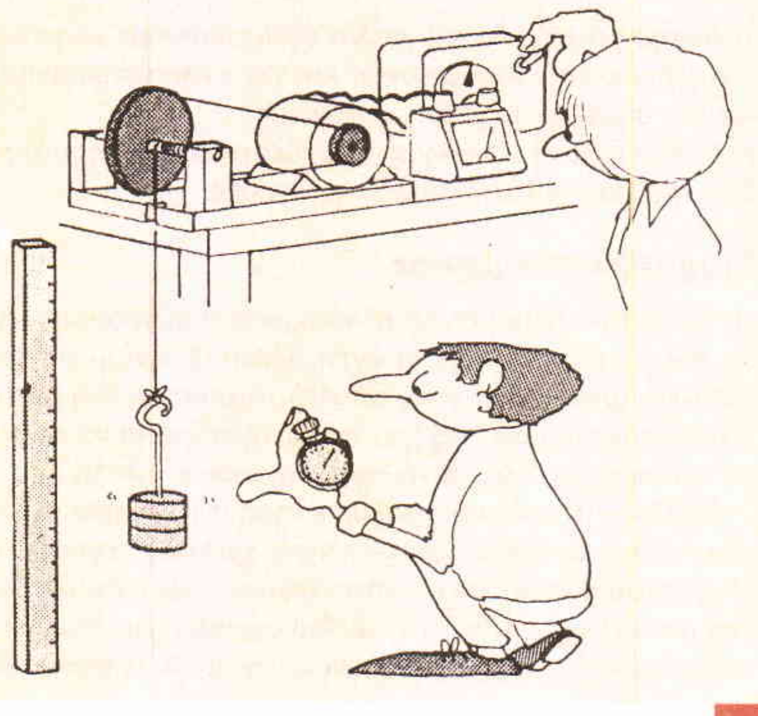
Ντοκουμέντο

Απόσπασμα από το βιβλίο
Το χρονικό του χρόνου
του Stephen W. Hauking

Η συμπεριφορά του εμβαδού μιας μαύρης τρύπας θύμιζε πολύ τη συμπεριφορά ενός φυσικού μεγέθους που ονομάζεται εντροπία· η εντροπία είναι το μέτρο του βαθμού αταξίας που υπάρχει σε ένα φυσικό σύστημα. Είναι σε όλους μας γνωστό, από την καθημερινή μας ζωή, ότι η αταξία τείνει να μεγαλώσει αν αφήσουμε τα πράγματα να εξελιχθούν από μόνα τους. (Αρκεί να σταματήσουμε να τακτοποιούμε το σπίτι και να επιδιορθώνουμε το αυτοκίνητο και πολύ σύντομα θα το διαπιστώσουμε). Μπορεί κανείς να δημιουργήσει τάξη όπου πριν υπήρχε αταξία, αλλά αυτό απαιτεί να καταναλωθεί προσπάθεια ή ενέργεια· έτσι όμως μικραίνει το διαθέσιμο ποσό της ενέργειας για δημιουργία τάξης.

Μια ακριβής διατύπωση αυτή της ιδέας περιέχεται στον δεύτερο νόμο της θερμοδυναμικής. Ο νόμος αυτός αναφέρει ότι η εντροπία ενός απομονωμένου φυσικού συστήματος μεγαλώνει πάντοτε, και πως όταν συνδεθούν μεταξύ τους δυο συστήματα η εντροπία του ενιαίου τελικού συστήματος είναι μεγαλύτερη από το άθροισμα της εντροπίας των δυο αρχικών συστημάτων. Ας πάρουμε για παράδειγμα το φυσικό σύστημα που αποτελείται από τα μόρια ενός αερίου περιορισμένου σε ένα δοχείο. Μπορεί να θεωρηθεί ότι αυτά τα μόρια συμπεριφέρονται όπως μικρές ελαστικές σφαίρες που συγκρούονται συνεχώς μεταξύ τους και με τα τοιχώματα του δοχείου. Όσο μεγαλύτερη είναι η θερμοκρασία του αερίου τόσο ταχύτερα κινούνται τα μόριά του, και με τόσο μεγαλύτερη συχνότητα και ορμή συγκρούονται με τα τοιχώματα του δοχείου –και τόσο μεγαλύτερη πίεση ασκούν πάνω τους. Ας υποθέσουμε ότι στην αρχή ένα διάφραγμα περιορίζει όλα τα μόρια μόνο στον μισό χώρο του δοχείου, στην αριστερή του πλευρά. Αν στη συνέχεια ανοίξουμε αυτό το διάφραγμα, τα μόρια, που έχουν την τάση να εξαπλώνονται, θα καταλάβουν ολόκληρο το χώρο του δοχείου, και την αριστερή και τη δεξιά του πλευρά. Σε κάποια χρονική στιγμή είναι δυνατόν να βρεθούν όλα ή στο αριστερό μισό ή στο δεξιό μισό του χώρου του δοχείου, αλλά είναι συντριπτικά περισσότερες οι πιθανότητες να υπάρχει ίσος περίπου αριθμός μορίων και στις δύο πλευρές. Αυτή η κατάσταση είναι μια κατάσταση λιγότερης τάξης, ή περισσότερης αταξίας, από την αρχική (πριν ανοίξουμε το διάφραγμα), όπου όλα τα μόρια βρίσκονταν στην αριστερή πλευρά του δοχείου. Λέμε λοιπόν ότι η εντροπία του αερίου έχει μεγαλώσει. Παρόμοια περίπτωση έχουμε όταν στην αρχή διαθέτουμε δύο δοχεία που το ένα περιέχει μόρια οξυγόνου και το άλλο μόρια αζώτου. Αν τοποθετήσουμε τα δυο δοχεία σε επαφή και απομακρύνουμε τα ενδιάμεσα τοιχώματα, τα μόρια του οξυγόνου και τα μόρια του αζώτου θα αρχίσουν να αναμειγνύονται. Σε κάποια χρονική στιγμή το πιθανότερο είναι ότι θα υπάρχει ένα αρκετά ομογενές μείγμα μορίων οξυγόνου και αζώτου και στα δύο δοχεία. Αυτή η κατάσταση θα χαρακτηρίζεται από λιγότερη τάξη, και έτσι μεγαλύτερη εντροπία, από την αρχική κατάσταση των δύο διαχωρισμένων δοχείων.

Να κάνουμε πειράματα



Α' μέρος

Εργαστηριακές ασκήσεις

• Ο ρυθμός μεταβολής της ταχύτητας • Προσεγγίζοντας το νόμο της ελεύθερης πτώσης • Οριζόντια βολή (Ο κόσμος της πράξης και των προσεγγίσεων) • Ο θεμελιώδης νόμος της δυναμικής • Τριβή • Κεντρομόλος δύναμη • Η διατήρηση της ορμής • Η μηχανική ενέργεια ελαττώνεται • Θερμότητα και θερμοκρασία.

Εργαστηριακή άσκηση 1

Ο ρυθμός μεταβολής της ταχύτητας

Γιατί κάνουμε αυτή την άσκηση

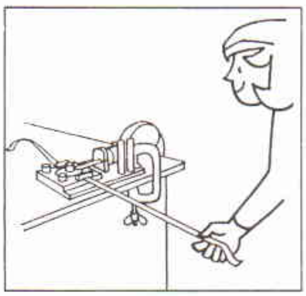
Η άσκηση αυτή γίνεται για να εξοικειωθούμε με μετρήσεις ταχυτήτων και επιταχύνσεων και για να κατανοήσουμε τι ακριβώς σημαίνει *σταθερή επιτάχυνση*.
Η μέθοδος αυτή θα χρησιμοποιηθεί και κατά τη μελέτη του δεύτερου νευτωνικού νόμου της κίνησης.

Τι χρειάζεται να ξέρουμε

α) Κατά την πειραματική μελέτη μιας ευθύγραμμης κίνησης το *πόσο μετακινείται* ένα αντικείμενο σε ορισμένη χρονική διάρκεια (μονάδα χρόνου) αποτελεί πρακτικά ένα μέτρο της ταχύτητάς του, αρκεί η χρονική αυτή διάρκεια να είναι μικρή σε σχέση με την ταχύτητα της ανθρώπινης αντίληψης.

β) Όταν σε μια ευθύγραμμη κίνηση η ταχύτητα αυξάνεται με σταθερό ρυθμό-σε ίσους δηλαδή, χρόνους παρατηρούνται ίσες μεταβολές-λέμε ότι η επιτάχυνση είναι σταθερή. Η τιμή της μπορεί να υπολογιστεί αν διαιρέσουμε μια οποιαδήποτε αύξηση ταχύτητας με τον χρόνο στον οποίο παρατηρήθηκε.

Τι υλικά θα χρειαστούμε



Θα χρειαστούμε τραπέζι, ηλεκτρικό χρονομετρητή με χαρτοταινία, ένα αμαξίδιο εργαστηρίου, σπάγκο, τροχαλία, δυο σφικτήρες, μερικές ροδέλες, ψαλίδι, σελοτέιπ και χάρακα.

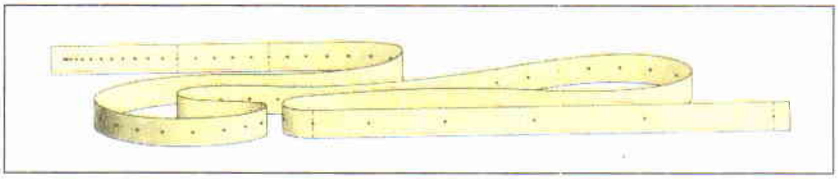
Τι κάνουμε

Θα μελετήσουμε την εξέλιξη δυο κινήσεων.

Η πρώτη

Στο ένα άκρο του τραπεζιού στερεώνουμε τον χρονομετρητή. Κόβουμε χαρτοταινία 80 περίπου εκατοστών και την περνάμε κάτω από το καρμπόν του χρονομετρητή. Φροντίζουμε ώστε το ένα της άκρο (αυτό που θα «ξετυμίσει» από το καρμπόν) να το κρατάμε με το χέρι μας, ενώ το άλλο, το αφήνουμε ελεύθερο. Θέτουμε σε λειτουργία τον χρονομετρητή και τραβάμε την ταινία από το άκρο που κρατούσαμε έτσι ώστε να διατηρείται –όσο το δυνατόν– οριζόντια. Κλείνουμε τον χρονομετρητή. Τα ίχνη πάνω στην ταινία αποτυπώνουν το *ιστορικό της κίνησης* του χεριού μας. Το σημαντικό είναι ότι τα ίχνη αυτά αντιστοιχούν σε καταγραφές των θέσεων του χεριού μας. Καθένα από τα ίσα χρονικά διαστήματα ανάμεσα σε δύο διαδοχικές καταγραφές το λέμε 1 τικ.

Η ταινία θα έχει τώρα την εξής περίπου μορφή.



Παίρνουμε το ψαλίδι και κόβουμε την χαρτοταινία εγκάρσια ανά πέντε κουκίδες. Δημιουργούμε λωρίδες. Το μήκος κάθε λωρίδας μάς δίνει το μέτρο της ταχύτητας. Αν είναι λόγου χάριν 20 mm, η ταχύτητα θα είναι 20 mm ανά 5 τικ. Κολλάμε στη συνέχεια τις λωρίδες τη μία δίπλα στην άλλη με τη σειρά που τις κόψαμε πάνω σε χαρτί μιλιμετρέ.



Η δεύτερη

Στην άλλη άκρη του τραπεζιού στερεώνουμε και την τροχαλία. Κόβουμε χαρτοταινία ενός περίπου μέτρου, την περνάμε κάτω από καρμπόν και κολλάμε το άκρο της με σελοτέιπ στο αμαξάκι. Δένουμε τον σπάγκο στην άλλη άκρη του αμαξιού, τον περνάμε από την τροχαλία και στο άλλο του άκρο προσδένουμε πέντε ροδέλες. Αρχικά συγκρατούμε το αμαξάκι και στη συνέχεια το αφήνουμε ελεύθερο.

Πάνω στη χαρτοταινία αποτυπώνεται το ιστορικό της κίνησης. Κάθε ίχνος έχει τη μορφή μιας κουκίδας. Κόβουμε τη χαρτοταινία ανά 5 κουκίδες. Έχουμε και πάλι λωρίδες τις οποίες κολλάμε τη μία δίπλα στην άλλη πάνω σε χαρτί μιλιμετρέ.

Η ανάγνωση των γεγονότων

Κατά την εξέλιξη τόσο της πρώτης όσο και της δεύτερης κίνησης η ταχύτητα μεταβάλλεται. Στη δεύτερη όμως κίνηση η μεταβολή φαίνεται να γίνεται με σταθερό ρυθμό. Κάθε 5 τικ η ταχύτητα παρουσιάζει την ίδια αύξηση. Η ευθύγραμμη κίνηση του αμαξιού είναι μια κίνηση με σταθερή επιτάχυνση, ενώ αυτό ίσως δεν συμβαίνει με την τυχαία απότομη κίνηση του χεριού μας. Στην κίνηση του αμαξιού μπορούμε να υπολογίσουμε την αύξηση της ταχύτητας σε mm ανά τικ. Εάν μάλιστα διαιρέσουμε με τον αντίστοιχο χρόνο θα υπολογίσουμε και την επιτάχυνση.

Η περίοδος της περιστροφής του τυμπάνου είναι ίση με τον χρόνο 1 τικ και, εφόσον την γνωρίζουμε, μπορούμε να υπολογίσουμε την επιτάχυνση της κίνησης σε m/s^2.

Εάν δεν υπάρχουν αρκετοί χρονομετρητές, το πείραμα γίνεται με ένα χρονομετρητή και οι λωρίδες παρουσιάζονται η μια δίπλα στην άλλη με σελοτέιπ στον πίνακα.

Ερωτήσεις

α. Στη χαρτοταινία αυτή έχει καταγραφεί το *ιστορικό μιας ευθύγραμμης κίνησης*. Σας ζητούμε να αποδείξετε ότι η κίνηση αυτή είναι ομαλά επιταχυνόμενη και να υπολογίσετε την τιμή της επιτάχυνσης.



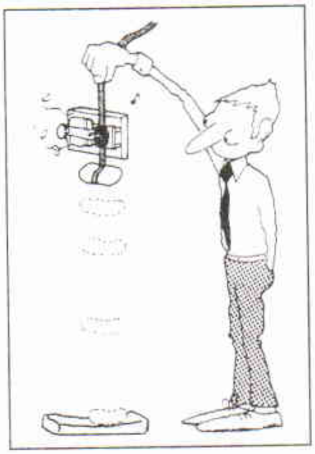
β. Σας ζητούμε να σχεδιάσετε πώς θα ήταν μια χαρτοταινία με τα ίχνη μιας ευθύγραμμης κίνησης με σταθερή επιτάχυνση 0,1 m/s^2, υποθέτοντας ότι αυτά έχουν καταγραφεί από ηλεκτρικό χρονομετρητή ανά 1/10 του δευτερολέπτου, επί ένα δευτερόλεπτο.

Εργαστηριακή άσκηση 2

Προσεγγίζοντας τον νόμο της ελεύθερης πτώσης

Γιατί κάνουμε αυτή την άσκηση

Με την άσκηση αυτή θέλουμε να δείξουμε ότι μέσα από τον δρόμο των έμπρακτων μετρήσεων μπορούμε να προσεγγίσουμε τον νόμο της ελεύθερης πτώσης.

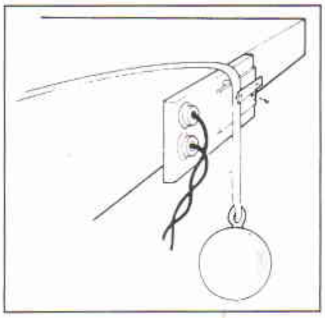


Τι χρειάζεται να ξέρουμε

α) Η απόσταση κατά την οποία μετακινείται ένα αντικείμενο σε ορισμένη χρονική διάρκεια μας δίνει το μέτρο της ταχύτητάς του εφόσον η χρονική αυτή διάρκεια (i) ληφθεί ως μονάδα μέτρησης και (ii) θεωρηθεί μικρή σε σχέση με την ανθρώπινη αντίληψη.
β) Κατά την ευθύγραμμη κίνηση ενός αντικειμένου εφόσον η ταχύτητά του αυξάνεται ανάλογα με τον χρόνο κίνησης ή επιτάχυνσή του είναι σταθερή.
γ) Σε μια ευθύγραμμη κίνηση με σταθερή επιτάχυνση μπορούμε να υπολογίσουμε την επιτάχυνση, διαιρώντας τη μεταβολή της ταχύτητας προς τον χρόνο στον οποίο συνέβη.
δ) Όταν ένα αντικείμενο έχει μεγάλο βάρος (σε σχέση με την αντίσταση του αέρα κατά την πτώση του) η πτώση του στον αέρα είναι μια κίνηση σχεδόν ίδια με την πτώση του στο κενό.

Τι υλικά θα χρειαστούμε

Ένα τραπέζι, σφικτήρες, ηλεκτρικό χρονομετρητή με χαρτοταινία, σελοτέιπ, ψαλίδι, χάρακα και ένα σχετικά βαρύ συμπαγές αντικείμενο. Καλό θα είναι να έχουμε και ένα μικρό μαξιλάρι.



Τι κάνουμε

Στερεώνουμε τον χρονομετρητή. Κόβουμε χαρτοταινία ενός περίπου μέτρου, την περνάμε κάτω από το καρμπόν του χρονομετρητή και στη μία άκρη της προσδένουμε το βαρύ αντικείμενο.

Συγκρατούμε αρχικά το αντικείμενο και στη συνέχεια το αφήνουμε να πέσει. Εάν διαθέτουμε και το μικρό μαξιλάρι, το αντικείμενο θα πέσει «στα μαλακά».

Στη χαρτοταινία έχει τώρα αποτυπωθεί το ιστορικό της κίνησης. Έχουμε ίχνη που αντιστοιχούν σε διαδοχικές θέσεις του αντικειμένου κατά την πτώση του.

Κόβουμε την χαρτοταινία σε κομμάτια που αντιστοιχούν σε χρονικά διαστήματα ίσα αλλά και διαδοχικά. Κάθε χρονικό διάστημα μπορεί να είναι το ένα τικ του χρονομετρητή, οπότε πρέπει να κόβουμε από το ένα ίχνος μέχρι το επόμενο. Έχουμε τώρα κομμένες λωρίδες, τις οποίες κολλάμε με τη σειρά τη μια δίπλα στην άλλη στο τετράδιο.

Η ανάγνωση των γεγονότων με τη βοήθεια των εννοιών

Το μήκος κάθε λωρίδας αντιστοιχεί σε μέτρο ταχύτητας. Διαπιστώνουμε ότι η αύξηση της ταχύτητας είναι «γραμμική». Το γεγονός μάς επιτρέπει να συμπεράνουμε ότι η πτώση που έγινε ήταν μια κίνηση με σταθερή επιτάχυνση. Την επιτάχυνση της πτώσης μπορούμε να τη μετρήσουμε σε m/s^2, μόνο αν ξέρουμε τη συχνότητα του χρονομετρητή, οπότε θα ξέρουμε και πόσο είναι το χρονικό διάστημα ανάμεσα σε δύο διαδοχικά ίχνη. Η συχνότητα στης περιστροφής του τυμπάνου μπορεί να μετρηθεί με στροβοσκόπιο. Αν λόγου χάριν διαπιστωθεί ότι η συχνότητα αυτή είναι 30 Hz, το χρονικό διάστημα ανάμεσα σε δύο διαδοχικά ίχνη είναι 1/30 s.

Ερωτήσεις

α. Ποιοι είναι, κατά την εκτίμησή σας, οι βασικοί λόγοι για τους οποίους η τιμή της επιτάχυνσης είναι μικρότερη από 9,8 m/s^2;

β. Πόσο θα έπρεπε να απέχει το πρώτο από το πέμπτο ίχνος και πόσο το πέμπτο από το δέκατο ίχνος της καταγραφής, αν η επιτάχυνση ήταν 9,8 m/s^2 ακριβώς και το χρονικό διάστημα ανάμεσα σε δύο ίχνη ίσο με 1/50 του δευτερολέπτου;

Εργαστηριακή άσκηση 3

Οριζόντια βολή

Ο κόσμος της πράξης και των προσεγγίσεων

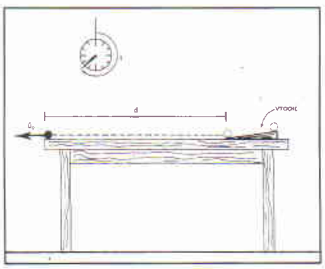
Η φυσική μπορεί να *ερμηνεύει* όσα έχουν ήδη συμβεί, αλλά και να *προβλέπει* γεγονότα που θα συμβούν στο μέλλον. Βασιζόμενοι α) στην αρχή της ανεξαρτησίας των κινήσεων β) στις εξισώσεις της ευθύγραμμης ομαλής κίνησης και γ) στην εξίσωση της ελεύθερης πτώσης, μπορούμε να προβλέψουμε τις μελλοντικές θέσεις ενός σημειακού αντικειμένου το οποίο εκτοξεύεται οριζόντια. Αν επιλέξουμε κατάλληλο σύστημα αναφοράς οι εξισώσεις που μας δίνουν τη μελλοντική θέση θα είναι

$$x = \upsilon_0 t \text{ και } y = \frac{1}{2} g t^2$$

Με απαλοιφή του χρόνου προκύπτει και η λεγόμενη εξίσωση τροχιάς.

$$y = \frac{g}{2\upsilon_0^2} x^2$$

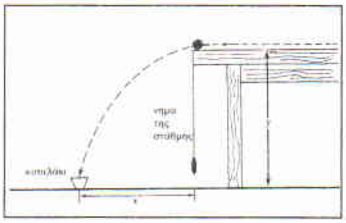
η οποία συσχετίζει τις συνεταγμένες x και y κάθε σημείου της τροχιάς. Οι εξισώσεις βέβαια αυτές, αναφέρονται στο μοντέλο *σημειακό αντικείμενο* και σε κίνηση στο κενό.
Να ξεφύγουμε τώρα λίγο από το «μαγικό» κόσμο των μοντέλων και να δούμε αν μπορούμε να κάνουμε μια τέτοια πρόβλεψη στον πραγματικό κόσμο της πράξης και των προσεγγίσεων.



Χρειαζόμαστε ένα αληθινό τραπέζι κι ένα αληθινό πάτωμα. Αυτά τα βρίσκουμε εύκολα. Κι ακόμα μια μπίλια, μία μετροταινία και χρονόμετρο. Να επιδιώξουμε να προβλέψουμε το σημείο, στο οποίο η μπίλια θα χτυπήσει το πάτωμα (σχήμα). Το σημείο αυτό μπορεί να προσδιοριστεί από τη συντεταγμένη x της εξίσωσης τροχιάς $y = gx^2/2\upsilon_0^2$ εφ' όσον το y θα είναι ίσο με το ύψος του τραπεζιού. Λύνουμε ως προς x:

$$x = \upsilon_0 \sqrt{2y/g}.$$

Ας δούμε τι ξέρουμε και τι μπορούμε να μετρήσουμε. Ξέρουμε την τιμή της βαρυτικής επιτάχυνσης $g = 9{,}81\ m/s^2$. Χρειαζόματε λοιπόν την τιμή του y και της αρχικής ταχύτητας υ_0. Το y δίνεται από το ύψος του τραπεζιού. Παίρνουμε τη μετροταινία και το μετράμε. Τι γίνεται τώρα με την ταχύτητα υ_0 που έχει η μπίλια τη στιγμή που εγκαταλείπει το τραπέζι; Η τιμή της καθορίζεται από το «τι προηγήθηκε». Χρειάζεται να επινοήσουμε μια διάταξη, με την οποία να μπορούμε, σε επαναλαμβανόμενα πειράματα, να παίρνουμε την ίδια τιμή οριζόντιας ταχύτητας υ_0. Μια καλή ιδέα είναι να αφήνουμε κάθε φορά την μπίλια από ένα ορισμένο σημείο κεκλιμένου επιπέδου. Μπορούμε να εξυπηρετηθούμε από ένα στερεωμένο ντοσιέ. Η μπίλια αφήνεται λοιπόν από ένα σημείο του υπερυψωμένου ντοσιέ.



Στη συνέχεια, πάνω στην οριζόντια επιφάνεια του τραπεζιού, διανύει μια απόσταση d, την οποία έχουμε προηγουμένως φροντίσει να μετρήσουμε, φτάνει στην άκρη του τραπεζιού, κάποιος βάζει το χέρι του και δεν την αφήνει να πέσει.

Στη διάρκεια της οριζόντιας μετακίνησης μετράμε με το χρονόμετρο στη χρονική διάρκεια, στην οποία διανύθηκε η απόσταση d και υπολογίζουμε τη μέση ταχύτητα, την οποία δεχόμαστε κατά προσέγγιση ίση με την ταχύτητα υ_0.

Η χρονομέτρηση είναι το πιο ευαίσθητο σημείο της διαδικασίας. Γι' αυτό επαναλαμβάνουμε τις μετρήσεις αρκετές φορές και προσδιορίζουμε ένα μέσο όρο για τις ταχύτητες. Την τιμή που προκύπτει τη βάζουμε στη θέση του υ_0 στην εξίσωση $x = \upsilon_0 \sqrt{2y/g}$.

Φθάσαμε έτσι σε μια πρόβλεψη που βασίστηκε στη θεωρία και στις μετρήσεις τις οποίες κάναμε. Έχουμε μετρήσει την τιμή της οριζόντιας ταχύτητας το τραπέζι και μπορούμε να προβλέψουμε σε ποιο σημείο, αν την αφήσουμε να εκσφενδονιστεί, θα συναντήσει το πάτωμα.

Στο πάτωμα, σε απόσταση $x = \upsilon_0 \sqrt{2y/g}$ από την κατακόρυφο της άκρης του τραπεζιού, βάζουμε ένα μικρό κυπελάκι και δοκιμάζουμε. Αφήνουμε τη μικρή μπίλια από το ορισμένο σημείο του ντοσιέ. Είναι μια ευκαιρία να δούμε κατά πόσο η πράξη ανταποκρίνεται σε διάφορα μοντέλα. Όσο σίγουρο είναι ότι δεν θα διαπιστώσουμε ταύτιση, άλλα τόσο σίγουρο είναι ότι τα αποτελέσματα δεν θα είναι ιδιαίτερα απογοητευτικά.

Ερωτήσεις

α. Ποιοι είναι οι κυριότεροι, κατά την εκτίμησή σας, λόγοι μιας ενδεχόμενης αποτυχίας του πειράματος;

β. Βασιζόμενοι στην τιμή την οποία μετρήσατε για την οριζόντια ταχύτητα υ_0 και στην τιμή $g = 9{,}81\ m/s^2$, σας ζητούμε

ι) να υπολογίσετε το χρονικό διάστημα από τη στιγμή που η μπίλια εγκαταλείπει το τραπέζι μέχρι τη στιγμή που φθάνει στο έδαφος.

ιι) να προσδιορίσετε τη θέση της 1/10 του δευτερολέπτου μετά από τη στιγμή που θα εγκαταλείψει το τραπέζι. Να αγνοήσετε την αντίσταση του αέρα.

γ) Αν αφήναμε τη μπίλια από ένα σημείο του υπερυψωμένου ντοσιέ ψηλότερα από το προηγούμενο η χρονική διάρκεια από τη στιγμή που θα άφηνε το τραπέζι μέχρι τη στιγμή που θα έφθανε στο έδαφος θα ήταν – σε σχέση με την προηγούμενη– μεγαλύτερη, μικρότερη ή ίση; Δικαιολογήστε την απάντηση.

Εργαστηριακή άσκηση 4

Ο θεμελιώδης νόμος της δυναμικής

Γιατί κάνουμε αυτή την άσκηση

Η άσκηση γίνεται για να ερευνήσουμε πειραματικά τη σχέση ανάμεσα στην ασκούμενη σ' ένα σώμα δύναμη και στην επιτάχυνσή του και να εξετάσουμε τον ρόλο της μάζας στη διαμόρφωση αυτής της σχέσης.

Τι πρέπει να ξέρουμε

Ο θεμελιώδης νόμος της δυναμικής διατυπώνεται με την εξίσωση $F = ma$, στην οποία το σύμβολο F παριστάνει τη συνισταμένη των δυνάμεων που ασκούνται σε ένα σώμα, το m τη μάζα του και το α την επιτάχυνσή του.

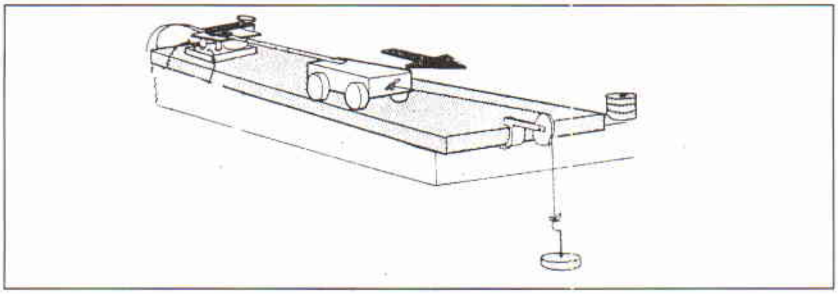
Τι υλικά θα χρειαστούμε

Θα χρειαστούμε όλα τα υλικά που χρησιμοποιούμε στην εργαστηριακή άσκηση 1. Θα χρειαστούμε επίσης ζυγό και επιπλέον σταθμά.

Τι κάνουμε

α. Ζυγίζουμε το αμαξάκι και προσθέτουμε σ' αυτό σταθμά ώστε η μάζα του να είναι 1 kg. Στη συνέχεια επαναλαμβάνουμε αυτά που κάναμε την εργαστηριακή άσκηση 1. Δένουμε τον σπάγκο στη μια άκρη του αμαξιού, τον περνάμε από την τροχαλία και στο άλλο άκρο προσδένουμε δύο ορειχάλκινους δακτυλίους βάρους περίπου 25p ή 0,25 N. Φροντίζουμε ώστε το κομμάτι του σπάγκου πάνω από το τραπέζι να είναι οριζόντιο. Συγκρατούμε αρχικά το αμαξάκι και το αφήνουμε στη συνέχεια ελεύθερο.

Πάνω στη χαρτοταινία καταγράφεται το ιστορικό της κί-



νησης. Κόβουμε τη χαρτοταινία ανά 10 κουκίδες και δημιουργούμε λωρίδες, τις οποίες κολλάμε τη μία δίπλα στην άλλη.

β. Επαναλαμβάνουμε το πείραμα με αμαξάκι ίδιου βάρους αλλά με βαρίδι στο άκρο του σπάγκου αυτή τη φορά 50 p.

γ. Εκτελούμε ένα παρόμοιο πείραμα φορτώνοντας στο αμαξάκι σταθμά, ώστε να διπλασιάσουμε το βάρος του. Στο άλλο άκρο του σπάγκου προσδένουμε τους ορειχάλκινους δακτυλίους 25p του πρώτου πειράματος.

Η ανάγνωση των γεγονότων

Κατά την κίνηση του αμαξιδίου η τριβή μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα. Η δύναμη που ασκεί το τεντωμένο νήμα (σπάγκος) μπορεί προσεγγιστικά να θεωρηθεί συνισταμένη. Στο πρώτο πείραμα η εικόνα που προκύπτει από τις κολλημένες λωρίδες μάς «λέει» ότι κατά τη διάρκεια της ευθύγραμμης κίνησης η επιτάχυνση ήταν σταθερή. Το ίδιο διαπιστώνεται και στα άλλα δυο πειράματα. Μπορούμε να το θεωρήσουμε αποτέλεσμα του ότι η ασκούμενη στο αμαξάκι δύναμη ήταν – κατά τη διάρκεια της κίνησης– σταθερή.

Από την εικόνα με τις διαδοχικά κολλημένες λωρίδες μπορούμε να υπολογίσουμε την επιτάχυνση. Εάν ο ηλεκτρικός χρονομετρητής έχει συχνότητα 50 Hz, η τιμή της μπορεί να υπολογιστεί σε m/s^2 διότι το χρονικό διάστημα είναι $10 \bullet 1/50$ s = 1/5 s. Εάν δεν γνωρίζουμε τη συχνότητα του χρονομετρητή υπολογίζουμε την τιμή της επιτάχυνσης βάσει της χρονικής μονάδας 1τικ.

α. Υπολογίζουμε την τιμή της επιτάχυνσης ($α_1$) στο πρώτο πείραμα. Η ασκούμενη στο αμαξάκι δύναμη μπορεί προσεγγιστικά να θεωρηθεί ίση με το βάρος β των δακτυλίων.

Για την ακρίβεια η δύναμη του τεντωμένου νήματος είναι μι-

κρότερη. Αυτό απορρέει από την εφαρμογή του δεύτερου νόμου της κίνησης. Η διαφορά όμως αυτή μπορεί να αγνοηθεί.

β. Στο δεύτερο πείραμα διαπιστώνεται ότι η επιτάχυνση (α_2) της κίνησης είναι διπλάσια από την προηγούμενη (α_1). Το αποτέλεσμα, δηλαδή, των μετρήσεων επιβεβαιώνει τον δεύτερο νόμο της κίνησης, (τον λεγόμενο και θεμελιώδη νόμο της δυναμικής) καθώς η ασκούμενη στο αμαξάκι δύναμη είναι *περίπου* διπλάσια από την προηγούμενη.

γ. Στο τρίτο από τα πειράματα η τιμή (α_3) της επιτάχυνσης υπολογίζεται ίση *περίπου* με το μισό της τιμής της α_1. Η μέτρηση επιβεβαιώνει τον θεμελιώδη νόμο της δυναμικής από την άποψη του ρόλου που έπαιξε η διαφορετική μάζα του κινητού.

Εάν βασιστούμε στις τιμές α_1 και α_3 των επιταχύνσεων (του πρώτου και του τρίτου πειράματος) και εφαρμόσουμε τον θεμελιώδη νόμο της δυναμικής μπορούμε να συγκρίνουμε τις αντίστοιχες μάζες.

Η σύγκριση αυτή ισοδυναμεί με μέτρηση της μιας αρκεί να δεχθούμε τη μάζα της άλλης ως μονάδας μέτρησης. Μια τέτοιου είδους μέτρηση βασίζεται στην εκδήλωση της αδράνειας των σωμάτων. Θα μπορούσαμε, μάλιστα, να την αντιπαραθέσουμε στη μέτρηση η οποία βασίστηκε στη ζύγιση, σε εκδήλωση δηλαδή της βαρύτητας των σωμάτων.

Ερωτήσεις

α. Στο δεύτερο πείραμα, η ασκούμενη στο αμαξάκι δύναμη θεωρήθηκε περίπου διπλάσια από την αντιστοιχη δύναμη του πρώτου πειράματος. Σε ποιους λόγους οφείλεται το ότι δεν είναι ακριβώς διπλάσια:

β. Αν αγνοήσουμε την τριβή η δύναμη του τεντωμένου νήματος είναι ίση με Ββ/(Β+β) όπου Β το βάρος του κινουμένου αμαξιδίου (με οτιδήποτε φέρει) και β το βάρος των δακτυλίων. Πως αποδεικνύεται αυτό βάσει του δευτέρου νόμου της κίνησης;

γ. Αν αγνοήσουμε την τριβή η επιτάχυνση του αμαξιδίου στο πρώτο πείραμα θα ήταν g/41. Πως αποδεικνύεται; Πόσο θα απείχαν σ' αυτή την υποθετική περίπτωση το πρώτο από το εικοστό πρώτο ίχνος της καταγραφής; Να υποθέσετε ότι η χρονική μονάδα 1 τικ είναι ίση 1/50 του δευτερολέπτου και ότι $g = 9{,}81\ m/s^2$.

Τριβή

Γιατί κάνουμε αυτή την άσκηση

Η άσκηση γίνεται με σκοπό να κατανοήσουμε την έννοια *τριβή* και να ερευνήσουμε μέσα από μετρήσεις το «από τι εξαρτάται η τιμή της».

Τι χρειάζεται να ξέρουμε

α. Όταν ένα αντικείμενο κινείται με σταθερή ταχύτητα, σύμφωνα με τον νόμο της αδράνειας η συνισταμένη των δυνάμεων που ασκούνται σ' αυτό είναι ίση με μηδέν.
β. Εάν η συνισταμένη δυο δυνάμεων είναι μηδέν οι δυνάμεις έχουν ίσα μέτρα και αντίθετες κατευθύνσεις.
γ. Όταν δύο στερεά αντικείμενα βρίσκονται σε επαφή και αλληλοσυμπιέζονται, το ένα ασκεί στο άλλο δύναμη (κάθετη αντίδραση) η οποία παριστάνεται με διάνυσμα κάθετο στην επιφάνεια επαφής και με κατεύθυνση προς το μέρος του αντικειμένου στο οποίο ασκείται. Εάν η επιφάνεια επαφής είναι επίπεδη, χωρίς να είναι οριζόντια, η κάθετη αντίδραση εξουδετερώνει τη μια συνιστώσα του βάρους, εφόσον βέβαια δεν υπάρχουν άλλες δυνάμεις.
δ. Οι δυνάμεις τις οποίες ασκεί ένα τεντωμένο νήμα σε καθένα από τα δύο αντικείμενα που βρίσκονται στα άκρα του έχουν ίσα μέτρα. Αυτό ισχύει εφόσον η μάζα του νήματος είναι αμελητέα.

Τι υλικά χρειάζονται

Χρειαζόμαστε μια σανίδα, σπάγκο, τροχαλία, δυο όμοια ξύλινα αντικείμενα σχήματος παραλληλεπιπέδου, ροδέλες γνωστού βάρους, ένα μικρό δίσκο στον οποίο θα βάζουμε τις ροδέλες και μοιρογνωμόνιο. Η σχετική διάταξη συνήθως υπάρ-

χει στο σχολικό εργαστήριο και λέγεται *τριβόμετρο*. Χρειαζόμαστε επίσης ζυγό.

Τι κάνουμε

α. Ζυγίζουμε τον δίσκο, τις ροδέλες και τα ξύλινα αντικείμενα. Διατηρώντας τη σανίδα οριζόντια τοποθετούμε πάνω της το ένα από αυτά.

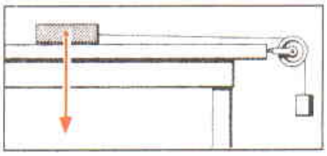
Συνδέουμε με σπάγκο το ξύλινο αυτό αντικείμενο με τον δίσκο μέσω της τροχαλίας. Βάζουμε στον δίσκο την πρώτη ροδέλα. Είναι πιθανόν να διαπιστώσουμε ισορροπία.

Προσθέτουμε στη συνέχεια και άλλες ροδέλες, μέχρις ότου το αντικείμενο αρχίζει να ολισθαίνει πάνω στην σανίδα κινούμενο αργά. Αυξομειώνοντας το φορτίο του δίσκου, επιδιώκουμε η ταχύτητα του αντικειμένου να είναι κατά προσέγγιση σταθερή. Θα έχουμε καλύτερο αποτέλεσμα εάν, εκτός από τις ροδέλες, χρησιμοποιήσουμε και πιο ελαφριά αντικείμενα όπως είναι τα μικρά καρφιά. Η διαπίστωση για τη σταθερότητα της ταχύτητας, μπορεί να βασιστεί είτε στην αντίληψη μας, είτε σε απλές χρονομετρήσεις ίσων μετατοπίσεων.

Η ανάγνωση των γεγονότων στη γλώσσα της φυσικής

α. Από τις ασκούμενες στο αντικείμενο δυνάμεις το βάρος (B) και η δύναμη στήριξης (F_κ) εξουδετερώνονται εφόσον η κίνηση γίνεται σε οριζόντιο επίπεδο ακόμα κι αν η ταχύτητα δεν ήταν σταθερή.

Η σταθερή ταχύτητα του αντικειμένου «σημαίνει» ότι η συνισταμένη όλων των ασκουμένων δυνάμεων είναι ίση με μηδέν. Το τεντωμένο νήμα ασκεί στο ξύλινο αντικείμενο δύναμη (F) με την κατεύθυνση της κίνησης. Για να ερμηνεύσουμε τη σταθερή ταχύτητα πρέπει λοιπόν να δεχθούμε ότι στο ξύλινο αντικείμενο ασκείται μια ακόμα δύναμη (ίση κατά μέτρο με την F αλλά με αντίθετη κατεύθυνση), διότι διαφορετικά θα είχαμε παραβίαση του νόμου της αδράνειας. Η φυσική ισχυρίζεται ότι η δύναμη αυτή (T) ασκείται από τη σανίδα και λέγεται τριβή ολίσθησης. Στο μεταξύ ο φορτωμένος δίσκος βάρους



Ας υποθέσουμε ότι για να το πετύχουμε απαιτήθηκε το βάρος δίσκου και φορτίου να είναι ίσο με Β′.

β. Επαναλαμβάνουμε τη διαδικασία με το ξύλινο αντικείμενο να στηρίζεται σε μια μικρότερη βάση του. Παρατηρούμε ότι το φορτίο που χρειάστηκε να έχουμε στον δίσκο ήταν το ίδιο με αυτό της προηγούμενης φοράς.

γ. Βάζουμε στη συνέχεια τα δύο ξύλινα αντικείμενα το ένα πάνω στο άλλο και διαπιστώνουμε ότι για να επιτύχουμε σταθερή επιτάχυνση απαιτούνται περισσότερες ροδέλες. Το βάρος του φορτίου είναι περίπου διπλάσιο από αυτό της προηγούμενης φοράς.

Β′ κινείται προς τα κάτω με σταθερή επίσης ταχύτητα, οπότε μπορούμε να συμπεράνουμε ότι η τριβή είναι τελικά ίση με το βάρος Β′.

β. Μολονότι το εμβαδόν της επιφάνειας στήριξης ήταν διαφορετικό, η τιμή τριβής είναι ίδια. Η τιμή της είναι ανεξάρτητη από το εμβαδόν.

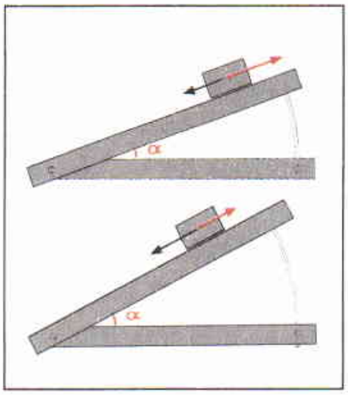
γ. Η τιμή της τριβής ολίσθησης έχει σχεδόν διπλασιαστεί. Η τριβή εμφανίζεται ανάλογη με το βάρος του αντικειμένου σε περίπτωση που αυτό μετατοπίζεται οριζόντια χωρίς να ασκούνται και άλλες δυνάμεις.

Μέτρηση του συντελεστή τριβής ολίσθησης

Αποδεχόμενοι την εξίσωση $T = \mu F_\kappa$ στην οποία το F_κ παριστάνει την κάθετη αντίδραση και το μ τον συντελεστή τριβής ολίσθησης, μπορούμε, βασιζόμενοι στα δεδομένα του πρώτου πειράματος, να μετρήσουμε τον συντελεστή. Για να το πετύχουμε, εφαρμόζουμε τους σχετικούς νόμους για καθένα από τα δύο κινούμενα σώματα. Αποδεικνύεται ότι

$$\mu = B'/B$$

όπου Β′ το βάρος δίσκου και φορτίου και Β το βάρος του ξύλινου αντικειμένου του πρώτου πειράματος



Τι άλλο κάνουμε

Λύνουμε τον σπάγκο και τοποθετούμε το ένα από τα ξύλινα αντικείμενα πάνω στη σανίδα. Σηκώνουμε τη σανίδα αργά ώστε η γωνία κλίσης, με το οριζόντιο επίπεδο να μεγαλώνει. Παρατηρούμε ότι μέχρι μια ορισμένη γωνία κλίσης το αντικείμενο ισορροπεί.

Όταν ξεπεράσουμε τη γωνία αυτή το αντικείμενο ολισθαίνει. Καταγράφουμε την *κρίσιμη* τιμή της γωνίας, στην οποία επίκειται ολίσθηση χρησιμοποιώντας το μοιρογνωμόνιο.

Η ανάγνωση των γεγονότων στη γλώσσα της φυσικής

Σημειώνουμε τις ασκούμενες στο αντικείμενο δυνάμεις καθώς αυτό ακινητεί. Αναλύουμε το βάρος του σε δύο συνιστώσες, τη B_x παράλληλη προς την επιφάνεια της σανίδας και τη B_y κάθετη σ' αυτήν.

Η B_y εξουδετερώνεται από την κάθετη αντίδραση $F_κ$. Ισχύει $F_κ = B_y$. Εφόσον το αντικείμενο –παρά την επίδραση της B_x – διατηρείται ακίνητο πρέπει να δεχθούμε ότι ασκείται σ' αυτό κάποια άλλη δύναμη.

Η φυσική υποστηρίζει ότι η δύναμη αυτή ασκείται από τη σανίδα και λέγεται *στατική τριβή*. Σύμφωνα με το νόμο της αδράνειας πρέπει να ισχύει $T_σ = B_x$. Καθώς αυξάνουμε τη γωνία κλίσης αυξάνει η B_x και εφόσον το αντικείμενο διατηρείται ακίνητο συμπεραίνουμε ότι αυξάνει και η τιμή της στατικής τριβής. Κατά τη στιγμή που επίκειται ολίσθηση πρέπει να αποδεχθούμε ότι η σανίδα ασκεί τη μέγιστη τιμή στατικής τριβής ($T_{σ, max}$) ότι «αδυνατεί», δηλαδή, να ασκήσει μεγαλύτερη δύναμη.



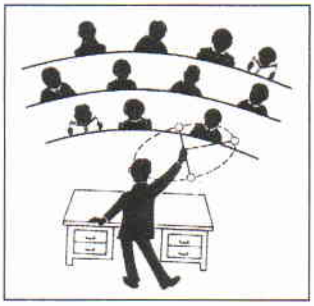
Μέτρηση του συντελεστή στατικής τριβής

Σύμφωνα με τη φυσική για τη μέγιστη στατική τριβή ισχύει $T_{σ, max} = μ_σ F_κ$, όπου $μ_σ$ ο λεγόμενος συντελεστής στατικής τριβής. Βασιζόμενοι i) στα δεδομένα των μετρήσεων ii) στους σχετικούς νόμους και iii) στα μαθηματικά μπορούμε να αποδείξουμε ότι για την τιμή του $μ_σ$ ισχύει $μ_σ = εφφ$ όπου φ η γωνία κλίσης στην οποία επίκειται η ολίσθηση

Εργαστηριακή άσκηση 6

Κεντρομόλος δύναμη

Γιατί κάνουμε αυτή την άσκηση



Η άσκηση αυτή γίνεται α) για να αποδειχτεί έμπρακτα ότι κατά την ομαλή κυκλική κίνηση ενός αντικειμένου ασκείται συνεχώς στο αντικείμενο (συνισταμένη) δύναμη με κατεύθυνση προς το κέντρο της τροχιάς και β) για να αποδειχθεί η σχέση της δύναμης αυτής με τη μάζα του αντικειμένου, με την ταχύτητα του αντικειμένου και με την ακτίνα της τροχιάς, σχέση η οποία έχει προηγουμένως παρουσιαστεί θεωρητικά.

Τι χρειάζεται να ξέρουμε

α) Κατά την ομαλή κυκλική κίνηση ενός αντικειμένου η συνισταμένη των δυνάμεων που ασκούνται σ' αυτό, σύμφωνα με τον θεμελιώδη νόμο της μηχανικής, είναι $F = m\upsilon^2/R$, όπου m η μάζα του αντικειμένου, υ η ταχύτητά του και R η ακτίνα της τροχιάς.

β) Όταν δέσουμε ένα αντικείμενο στο άκρο ενός σπάγκου και το ενεργοποιήσουμε, ώστε να εκτελεί ομαλή κυκλική κίνηση σε οριζόντιο κύκλο, οι δυνάμεις που ασκούνται στο αντικείμενο είναι i) το βάρος του και ii) η δύναμη από το τεντωμένο βήμα.

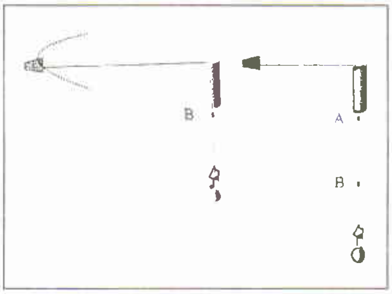
Σε μια τέτοια περίπτωση η δύναμη βάρος μπορεί να θεωρηθεί ασήμαντη σε σχέση με τη δύναμη που ασκεί το τεντωμένο νήμα, οπότε μπορούμε να θεωρούμε ότι η δύναμη του νήματος είναι η συνισταμένη των ασκούμενων δυνάμεων και λειτουργεί ως κεντρομόλος δύναμη.

Τι υλικά χρειαζόμαστε

Χρειαζόμαστε i) έναν μεταλλικό σωλήνα πάχους 10 mm και μήκους 120 mm ii) ανθεκτικό πλαστικό σπάγκο iii) τέσσερις ορειχάλκινους δακτυλίους και iv) ελαστικά πώματα μικρού

μεγέθους. Μας είναι επίσης απαραίτητο ένα χρονόμετρο και ένα υποδεκάμετρο.

Τι κάνουμε



Εφόσον η διάταξη δεν υπάρχει έτοιμη στο σχολικό εργαστήριο θα χρειαστεί να τρυπήσουμε τα πώματα με μυτερό καρφί και να περάσουμε την άκρη του σπάγκου.

Μια χοντρή βελόνα μάς είναι βέβαια απαραίτητη. Στο άλλο άκρο του σπάγκου κάνουμε μια θηλιά για να κρεμάμε τους δακτυλίους. Περνάμε τον σπάγκο από τον μεταλλικό σωλήνα, κρεμάμε έναν ορειχάλκινο δακτύλιο για να τεντωθεί και σε κάποιο σημείο (Α) βάζουμε ένα σημάδι. Σε απόσταση 25 cm πιο κάτω βάζουμε ένα άλλο σημάδι Β.

Έχοντας στο άλλο άκρο του νήματος κρεμάσει έναν ορειχάλκινο δακτύλιο ενεργοποιούμε το πώμα ώστε να εκτελέσει κυκλική κίνηση σε οριζόντιο επίπεδο.

Η τροχιά του σταθεροποιείται όταν η ακτίνα της είναι 50 cm και αυτό διαπιστώνεται εφόσον το σημείο Β βρίσκεται κάτω ακριβώς από τον σωλήνα.

Μετράμε με το χρονόμετρο τον χρόνο δέκα περιστροφών και υπολογίζουμε την περίοδο της κίνησης, έστω T_1. Κρεμάμε στη συνέχεια στην άκρη του σπάγκου τέσσερις όμοιους δακτυλίους και περιστρέφουμε με την ίδια ακτίνα. Υπολογίζουμε την περίοδο της κίνησης έστω T_2. Διαπιστώνουμε ότι η $T_2 = T_1/2$

Η ανάγνωση των γεγονότων με τη βοήθεια εννοιών

Το βάρος του πώματος σε σχέση με τη δύναμη που ασκεί το τεντωμένο νήμα είναι αμελητέο. Η δύναμη λοιπόν του τεντωμένου νήματος είναι η συνισταμένη των ασκούμενων στο πώμα δυνάμεων και μπορεί συνεπώς να χαρακτηριστεί *κεντρομόλος δύναμη*.

Η δύναμη αυτή ($F_{ολ}$) είναι στην πρώτη περίπτωση ίση με το βάρος ενός δακτυλίου και στη δεύτερη ίση με το βάρος των τεσσάρων δακτυλίων. Στο δεύτερο δηλαδή πείραμα η δύναμη

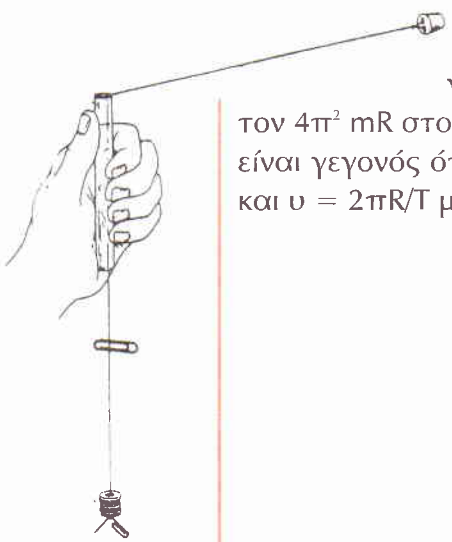
$F_{ολ}$ είναι τετραπλάσια σε σχέση με το πρώτο.
Η ταχύτητα του πώματος στη δεύτερη περίπτωση είναι διπλάσια σε σχέση με την ταχύτητα στην πρώτη. Αυτό απορρέει i) από το γεγονός ότι στην πρώτη περίπτωση ο χρόνος μιας περιστροφής είναι διπλάσιος από τον αντίστοιχο χρόνο της δεύτερης καθώς και ii) από το ότι και οι δύο κινήσεις έγιναν με την ίδια ακτίνα τροχιάς.

Το συμπέρασμα

Ενώ η ταχύτητα της δεύτερης κίνησης ήταν διπλάσια, η ασκούμενη στο αντικείμενο (συνισταμένη) δύναμη ήταν τετραπλάσια. Η διαπίστωση επιβεβαιώνει τη θεωρητική εξίσωση $F_{ολ} = mυ^2/R$, σύμφωνα με την οποία (προκειμένου για αντικείμενο ορισμένης μάζας που εκτελεί ομαλή κυκλική κίνηση ορισμένης ακτίνας) *η κεντρομόλος δύναμη είναι ανάλογη προς το τετράγωνο της ταχύτητας.*

Σας ζητούμε:

α) Να επαναλάβετε τρεις ακόμα φορές το πείραμα χρησιμοποιώντας διαφορετικό, κάθε φορά, αριθμό δακτυλίων. Να καταγράψετε τις τιμές δύναμης ($F_{ολ}$) και περιόδου (T).
β) Να κάνετε τη γραφική παράσταση $F_{ολ} = f(1/T^2)$. Θα διαπιστώσετε αναλογία. Βασιζόμενοι στη γραφική παράσταση να υπολογίσετε τον συντελεστή της αναλογίας $F_{ολ}$ και $1/T^2$.
γ) Να συγκρίνετε τον συντελεστή αυτόν με τον $4π^2 mR$ στον οποίο καταλήγει η θεωρητική μελέτη. Διότι είναι γεγονός ότι ο συνδυασμός των εξισώσεων $F_{ολ} = mυ^2/R$ και $υ = 2πR/T$ μας οδηγεί στη $F_{ολ} = 4π^2 mR/T^2$.



Εργαστηριακή άσκηση 7

Η διατήρηση της ορμής

Γιατί κάνουμε αυτή την άσκηση

Με την άσκηση αυτή θέλουμε να επιβεβαιώσουμε την αρχή της διατήρησης της ορμής αποδεικνύοντας ότι ισχύει σ' ένα *φαινόμενο ανάκρουσης* και να την εφαρμόσουμε προκειμένου να μετρήσουμε τη μάζα ενός αντικειμένου.

Τι χρειάζεται να ξέρουμε

α. Η ορμή ενός σώματος σε μεταφορική κίνηση είναι ίση με το γινόμενο της μάζας του επί την ταχύτητά του.

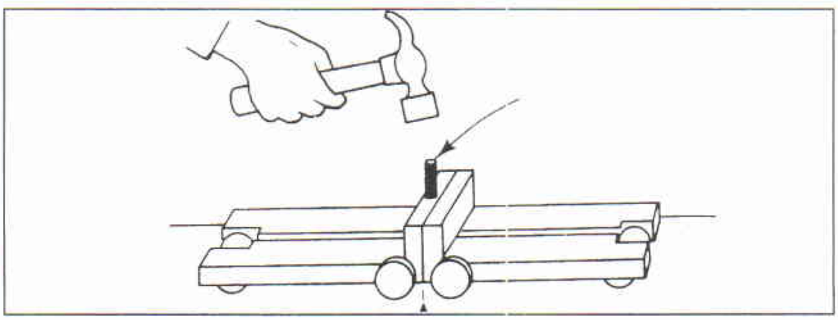
β. Ορμή ενός συστήματος λέγεται το (διανυσματικό) άθροισμα των ορμών.

γ. Η ορμή ενός συστήματος διατηρείται σταθερή, εφόσον δεν ασκούνται εξωτερικές δυνάμεις.

δ. Όταν το άθροισμα δύο διανυσμάτων είναι μηδέν τα δύο διανύσματα έχουν ίσα μέτρα και αντίθετες κατευθύνσεις.

ε. Καθώς ένα αμαξάκι εργαστηρίου κινείται πάνω σε ένα οριζόντιο σχετικά λείο τραπέζι, η τριβή μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα και η ταχύτητά του σταθερή.

Τι υλικά θα χρειαστούμε



Θα χρειαστούμε ένα μακρύ τραπέζι, δύο αμαξάκια εργαστηρίου και δύο κατάλληλα εμπόδια πάνω στα οποία θα προσπέσουν τα αμαξάκια. Χρειαζόμαστε επίσης μετροταινία, δύο χρονόμετρα και ζυγό.

Τι κάνουμε

α. Τοποθετούμε τα δύο όμοια αμαξάκια πάνω στο μεγάλο τραπέζι στη μέση της απόστασης ανάμεσα στις δύο άκρες. Σε κάθε άκρη του τραπεζιού έχουμε τοποθετήσει από ένα ακλόνητο εμπόδιο.

Τα δύο αμαξάκια είναι ακίνητα και βρίσκονται σε επαφή. Στο ένα αμάξι υπάρχει ένα ελατήριο το οποίο έχουμε προηγουμένως συμπιέσει. Όταν ελευθερώνεται δημιουργεί –μέσα από ειδικό μηχανισμό– μια ώθηση στο άλλο οπότε τα αμάξια απωθούνται αμοιβαία. Αφήνουμε το ελατήριο απότομα ελεύθερο και τα αμαξάκια εκτινάσσονται. Τα βλέπουμε να κινούνται προς αντίθετες κατευθύνσεις και να φθάνουν ταυτόχρονα στις δύο άκρες του τραπεζιού. Το διαπιστώνουμε γιατί ακούμε ένα μόνο ήχο από την πρόσκρουσή τους στα αντίστοιχα εμπόδια.

β. Ένας μαθητής αναλαμβάνει να ζυγίσει τα αμαξάκια ενώ ένας άλλος μετράει το μήκος τους. Ένας τρίτος μετράει, στο μεγάλο τραπέζι, την απόσταση δύο σημείων και προσδιορίζει το μέσον της. Ένας άλλος τοποθετεί τα αμαξάκια πάνω στο τραπέζι ώστε το σημείο επαφής τους να βρίσκεται στο μέσον της απόστασης και φορτώνει στο ένα από αυτά δύο όμοια ξύλινα αντικείμενα. Δύο από τους μαθητές κρατούν από ένα χρονόμετρο. Όσα έγιναν στο προηγούμενο πείραμα επαναλαμβάνονται αλλά, αυτή τη φορά, ο ένας από τους μαθητές – χρονομέτρες μετράει τη χρονική διάρκεια της κίνησης του φορτωμένου αμαξιού και ο άλλος του αμαξιού που δεν έχει φορτίο. Όλοι πάντως διαπιστώνουν ότι το φορτωμένο αμαξάκι φθάνει στο άκρο της δικής του διαδρομής πιο αργά.

Η θεωρητική σκέψη

Στο *πρώτο πείραμα* επιβεβαιώνεται η αρχή της διατήρησης

της ορμής.

Η ισότητα των χρόνων και των αποστάσεων μάς οδηγεί στο συμπέρασμα ότι τα μέτρα των ορμών είναι ίσα και –εφόσον οι ορμές των δυο αμαξιών έχουν αντίθετες κατευθύνσεις– η ορμή του συστήματος μετά την εκτίναξη είναι ίση με μηδέν. Ας μην ξεχνάμε ότι το άθροισμα δύο διανυσμάτων με ίσα μέτρα και αντίθετες κατευθύνσεις είναι ίσο με μηδέν. Το πείραμα, δηλαδή, μας αποδεικνύει ότι η ορμή του συστήματος μετά την εκτίναξη είναι ίση με μηδέν, όση δηλαδή ήταν η ορμή (του ίδιου συστήματος) πριν ελευθερώσουμε το ελατήριο.

Με το *δεύτερο πείραμα,* αποδεχόμενοι την αρχή της διατήρησης της ορμής, μπορούμε να μετρήσουμε τη μάζα του φορτίου.

Σας ζητούμε:

α. Βασιζόμενοι στις μετρήσεις του δεύτερου πειράματος να υπολογίσετε

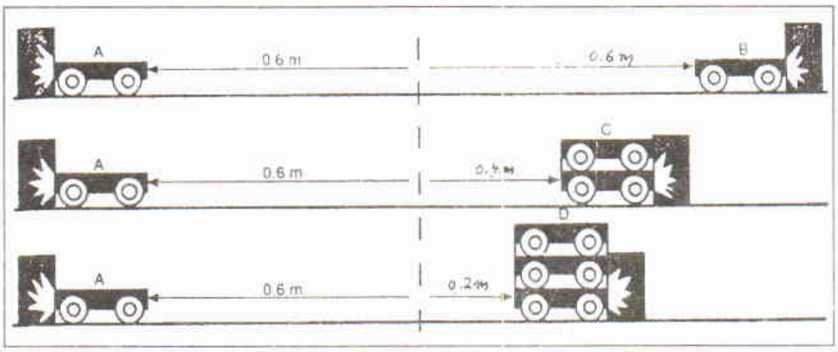
ι) την ταχύτητα κάθε αμαξιού μετά την εκτίναξη

ιι) την ορμή κάθε αμαξιού μετά την εκτίναξη

ιιι) τη *μάζα* καθενός από τα δύο όμοια ξύλινα αντικείμενα,

β. Να ζυγίσετε στη συνέχεια ένα από τα ξύλινα αντικείμενα να προσδιορίσετε τη μάζα του και να τη συγκρίνετε με εκείνη στην οποία καταλήξατε με την προηγούμενη μέτρηση.

• Να θεωρήσετε ότι οι κινήσεις των αμαξιών είναι ευθύγραμμες ομαλές.



• Αν δεν υπάρχει κατάλληλο τραπέζι να κάνετε το πείραμα στο πάτωμα της αίθουσας.

Εργαστηριακή άσκηση 8

Η μηχανική ενέργεια ελαττώνεται

Γιατί κάνουμε αυτή την άσκηση

Με την άσκηση θέλουμε να δείξουμε ότι αν οι έμπρακτες δραστηριότητες που περιλαμβάνουν και μετρήσεις, συνδυαστούν με τη θεωρητική σκέψη μπορούν να μας οδηγήσουν σε ποσοτικές διαπιστώσεις για τη μείωση της μηχανικής ενέργειας ενός συστήματος και στον υπολογισμό του συντελεστή τριβής.

Τι πρέπει να ξέρουμε

Στον κόσμο των πραγματικών αντικειμένων η μηχανική ενέργεια ενός συστήματος (εφόσον σ' αυτό δεν μεταβιβάζεται ενέργεια) βαθμιαία ελαττώνεται και η ελάττωση αυτή σχετίζεται με την παρουσία της τριβής ολίσθησης.

Η εξαφάνιση, όμως, μιας ποσότητας μηχανικής ενέργειας συνδέεται με την εμφάνιση μιας ποσότητας ενέργειας με άλλη μορφή. Σε περιπτώσεις όπως αυτή που θα ερευνήσουμε η ποσότητα μηχανικής ενέργειας που «χάθηκε» είναι απολύτως ίση με το γινόμενο της τριβής επί τη μετατόπιση του αντικειμένου στο οποίο ασκείται.

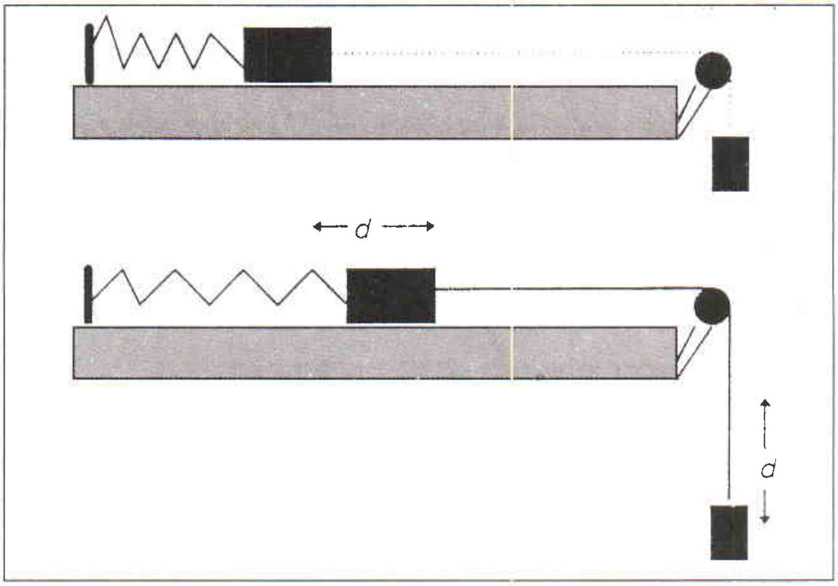
Τι υλικά θα χρειαστούμε

Θα χρειαστούμε *τραπέζι, τροχαλία, νήμα, ελατήριο* και δύο *ξύλινα αντικείμενα*, τα οποία θα ονομάζουμε $Σ_1$ και $Σ_2$.

Από όργανα μέτρησης θα χρειαστούμε *μετροταινία* και *ζυγό.*

Τι κάνουμε

Ζυγίζουμε τα δύο αντικείμενα και έστω ότι τα βάρη τους εί-



ναι B_1 και B_2.

Προσδιορίζουμε τη σταθερά (k) του ελατηρίου χρησιμοποιώντας το ένα από τα αντικείμενα το οποίο κρεμάμε από το άκρο του ελατηρίου και μετράμε την επιμήκυνση x.

Η ισορροπία του εκφράζεται με τη σχέση $k\,x = B_2$ άρα $x = B_2/k$.

Τοποθετούμε, στη συνέχεια, το ξύλινο αντικείμενο Σ_1 πάνω στο τραπέζι και το συνδέουμε από το ένα άκρο με το ελατήριο και από το άλλο με το Σ_2, μέσω τροχαλιας όπως στο σχήμα.

Αρχικά συγκρατούμε το σύστημα ώστε το ελατήριο να βρίσκεται στο φυσικό του μήκος και αφήνουμε το σύστημα ελεύθερο. Το Σ_2 κινείται προς τα κάτω μέχρι που σε κάποια στιγμή η ταχύτητά του γίνεται, για πρώτη φορά, μηδέν. Ως *τελική κατάσταση* θεωρούμε αυτήν ακριβώς στην οποία οι ταχύτητες των δύο αντικειμένων μηδενίζονται *για πρώτη φορά*. Μετράμε τη μετατόπιση του Σ_1. Έστω ότι είναι d.

Οι μετρήσεις

Μέχρι τώρα έχουμε μετρήσει i) Το βάρος του Σ_1 ii) Το βάρος του Σ_2 iii) Την επιμήκυνση του ελατηρίου (x) όταν ήταν κατα-

κόρυφο και είχαμε κρεμάσει το $Σ_2$. iv) Τη μετατόπιση d του $Σ_1$, πάνω στο τραπέζι η οποία είναι ίση κατά μέτρο με την κατακόρυφη μετατόπιση του $Σ_2$.

Η θεωρητική σκέψη Ενδιαφερόμαστε για την ενέργεια του συστήματος

Στην αρχική κατάσταση: Η κινητική ενέργεια του συστήματος είναι ίση με μηδέν. $K_{αρχ} = 0$. Η δυναμική ενέργεια του συστήματος είναι η βαρυτική δυναμική ενέργεια των $Σ_1$ και $Σ_2$ ως προς οριζόντια επιφάνεια την οποία επιλέγουμε να διέρχεται από τη θέση στην οποία θα βρεθεί τελικά το $Σ_2$.

$$U_{αρχ} = B_1 h + B_2 d$$

Το ελατήριο, αρχικά, βρίσκεται στο φυσικό του μήκος.

Στην τελική κατάσταση: Η κινητική ενέργεια του συστήματος είναι πάλι ίση με μηδέν $K_{τελ} = 0$. Η δυναμική ενέργεια του συστήματος είναι

i) η βαρυτική δυναμική ενέργεια του $Σ_1$ ίση με την αρχική

ii) η βαρυτική δυναμική ενέργεια του $Σ_2$ ίση με μηδέν.

iii) η ελαστική δυναμική ενέργεια του τεντωμένου (κατά d) ελατηρίου.

$$U_{τελ} = B_1 h + ½ k d^2$$

Τόσο οι μετρήσεις όσο και θεωρητική σκέψη μας οδηγούν στο συμπέρασμα ότι η ενέργεια του συστήματος ελαττώθηκε. Πρόκειται βέβαια για μια φαινομενική εξαφάνιση μιας ποσότητας ενέργειας.

$$(B_1 h + B_2 d) - (B_1 h + ½ k d^2) = B_2 d - ½ k d^2$$

η οποία είναι ίση με το γινόμενο της τριβής επί τη μετατόπιση (d) του αντικειμένου

Για την τριβή ολίσθησης ισχύει $T = μB_1$ οπότε

$μB_1 d = B_2 d - ½ k d^2$ ή $μB_1 = B_2 - ½ k d$

Αν αντικαταστήσουμε το k με το ίσο του B_2/x, η τελευταία εξίσωση θα γίνει:

$$μ = B_2 / B_1 (1 - d / 2x)$$

από την οποία μπορούμε να υπολογίσουμε τον συντελεστή τριβής.

Σας ζητούμε:

α. Να θεωρήσετε μια οποιαδήποτε οριζόντια επιφάνεια αναφοράς (θα μπορούσε, λόγου χάριν, να είναι αυτή που αντιστοιχεί στο πάτωμα της αίθουσας) και σε σχέση με αυτήν να υπολογίσετε πόσα τζάουλ είναι

ι) η αρχική μηχανική ενέργεια του συστήματος

ιι) η τελική μηχανική ενέργεια του συστήματος

ιιι) η ελάττωση της μηχανικής ενέργειας.

β. Να θεωρήσετε στη συνέχεια μιαν άλλη οριζόντια επιφάνεια ψηλότερα από την προηγούμενη και να κάνετε τους ίδιους υπολογισμούς σε τζάουλ. Τι έχετε να παρατηρήσετε;

γ. Να δηλώσετε αν συμφωνείτε με τις παρακάτω διατυπώσεις

ι) Κατά την εξέλιξη του πειράματος – μέχρι δηλαδή τη στιγμή που η ταχύτητα κάθε αντικειμένου γίνεται για πρώτη φορά μηδέν– η ελαστική δυναμική ενέργεια του συστήματος «ελατήριο – $Σ_1$» παρουσιάζει αύξηση.

ιι) Κατά την εξέλιξη του πειράματος η κίνηση του $Σ_2$ ήταν ομαλά επιταχυνόμενη.

ιιι) Καθώς το $Σ_2$ κατεβαίνει η δυναμική του ενέργεια παρουσιάζει ελάττωση.

Εργαστηριακή άσκηση 9

Θερμότητα και θερμοκρασία

Γιατί κάνουμε αυτή την άσκηση

Στην περίπτωση που η μεταβίβαση θερμότητας σε ένα σώμα έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της θερμοκρασίας του, τα ερωτήματα που τίθενται είναι:

Από τι εξαρτάται η αύξηση της θερμοκρασίας; Από το *πόση θερμότητα θα μεταβιβαστεί;* Από το *πόση είναι η μάζα* του σώματος; Από το υλικό; Από άλλους παράγοντες;

Η άσκηση γίνεται με σκοπό να αναζητήσουμε απαντήσεις στα ερωτήματα αυτά.

Τι χρειάζεται να ξέρουμε

Χρειάζεται να έχουμε αποδεχτεί ότι η θερμότητα που μεταβιβάζεται από τη φλόγα ενός λύχνου είναι ανάλογη προς το χρόνο μεταβίβασης. Η αποδοχή αυτή βασίζεται λογικά στο γεγονός ότι η ποσότητα καυσίμου που καταναλώνει ο λύχνος είναι ανάλογη του χρόνου.

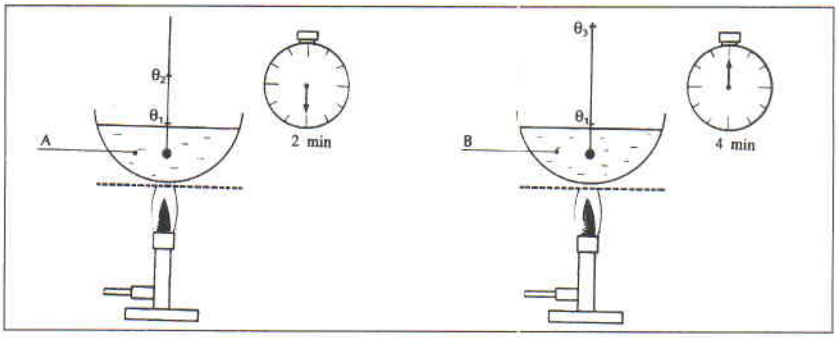
Τι υλικά θα χρειαστούμε

Ένα δοχείο, νερό, πετρέλαιο (ή λάδι), λύχνο Bunsen, χρονόμετρο, ζυγαριά και θερμόμετρο.

Τι κάνουμε. Σε ποια συμπεράσματα καταλήγουμε

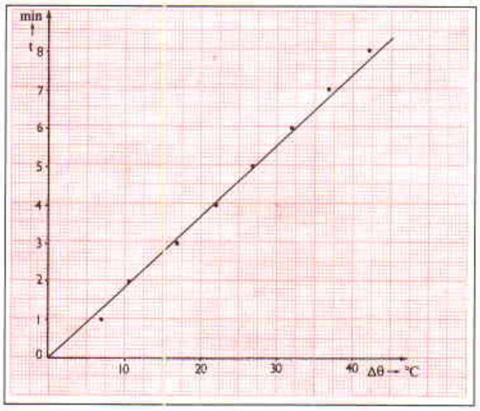
Θέτουμε ένα ένα τα ερωτήματα που σχετίζονται με κάποιες υποψίες μας και αναζητούμε την απάντηση σε καθένα από αυτά, μέσα από πειράματα παρόμοια με αυτά που περιγράφονται.

Το πρώτο ερώτημα που περιμένει απάντηση είναι: *Ποια σχέση υπάρχει ανάμεσα στην μεταβιβαζόμενη σε ένα σώμα θερμότητα και τη θερμοκρασιακή του μεταβολή;*



Βάλαμε μια ποσότητα νερού σε ένα δοχείο. Προηγουμένως είχαμε φροντίσει να προμηθευτούμε χρονόμετρο και θερμόμετρο το οποίο έδειξε την αρχική θερμοκρασία του νερού, έστω $\theta_1 = 21\,^\circ C$. Στη συνέχεια αρχίσαμε να θερμαίνουμε το σύστημα με τη σταθερή φλόγα λύχνου Bunsen. Δουλεύοντας προσεκτικά καταφέραμε να παίρνουμε θερμοκρασιακές ενδείξεις ανά ένα πρώτο λεπτό. Κάναμε κι έναν πίνακα με τις αντίστοιχες ενδείξεις χρονομέτρου και θερμομέτρου κατά τη διάρκεια μιας θέρμανσης που κράτησε οκτώ λεπτά. Η μάζα του νερού που χρησιμοποιήθηκε ήταν 1 kg.

t min	θ °C	Δθ °C
0	21,0	0,0
1	28,0	7,0
2	31,5	10,5
3	38,0	17,0
4	43,0	22,0
5	48,0	27,0
6	53,0	32,0
7	58,0	37,0
8	63,0	42,0



Τι συμπέρασμα βγαίνει από τις τιμές που πήραμε; Ότι η αύξηση θερμοκρασίας φαίνεται να είναι περίπου ανάλογη προς το χρόνο, άρα και προς το ποσό θερμότητας που χρει-

άστηκε για να παραγματοποιηθεί.

Σε πειράματα μεγαλύτερης ακρίβειας, τα οποία θα παίρνουν υπ' όψη τους τόσο τις απώλειες θερμότητας στο περιβάλλον όσο και το ποσό θερμότητας που απορροφάται από το δοχείο, η αναλογία ποσού θερμότητας και θερμοκρασιακής μεταβολής φαίνεται ακόμα πιο καθαρά. Αν χρησιμοποιήσουμε τη λογική της γενίκευσης που αποτελεί ένα από τα θεμέλια των φυσικών επιστημών, μπορούμε να ισχυριστούμε –διατηρώντας και τις επιφυλάξεις αναφορικά με τις εξαιρέσεις που θα προκύψουν – ότι για κάθε σώμα (σύστημα) που θερμαίνεται ισχύει μια σχέση της μορφής $Q = k\Delta\theta$. Το σύμβολο k παριστάνει ένα συντελεστή-μέγεθος, που αφορά το σώμα ή το σύστημα και ονομάζεται *θερμοχωρητικότητα*. Μια σχέση ίδιας μορφής υφίσταται και στην περίπτωση που το σύστημα αποδίδει ένα ποσό θερμότητας και η θερμοκρασία του ελαττώνεται.

Ο ρόλος της μάζας. Ένα δεύτερο ερώτημα που έρχεται τώρα φυσιολογικά είναι: Τι ρόλο παίζει η μάζα του θερμαινόμενου σώματος; Για την απάντηση μπορούμε πάλι να προσφύγουμε σε ένα πείραμα σαν το προηγούμενο. Χρησιμοποιούμε το ίδιο δοχείο, αλλά με διπλάσια μάζα νερού. Προηγουμένως είχαμε βάλει 1 kg, τώρα βάζουμε 2 kg. Ο προσδιορισμός της μάζας γίνεται με ογκομετρικό σωλήνα ή, ακόμα καλύτερα, με ζυγό.

Η αρχική θερμοκρασία είναι 21 °C.

t min	0	2	4	6	8	10
θ °C	21	28	32	39	44	49,5
Δθ (ΔΤ) °C	–	7	11	17	23	28,5

Να επιχειρήσουμε μια «ανάγνωση» της καινούργιας απάντησης, που μας δίνει η φύση μέσα από τα όργανα και τις ενδείξεις. Η αναλογία $Q = k\Delta\theta$ φαίνεται πάλι να επιβεβαιώνεται αλλά η τιμή k της θερμοχωρητικότητας παρουσιάζεται διαφορετική. Η θερμοχωρητικότητα του σώματος *2 kg νερού* εμφανίζεται περίπου διπλάσια από τη θερμοχωρητικότητα του

σώματος *1kg νερού*.

Με λόγια διαφορετικά, μπορούμε να πούμε ότι από την αντιπαράθεση των αποτελεσμάτων που πήραμε από τα δύο πειράματα, βλέπουμε ότι ο διπλασιασμός της μάζας επέβαλε έναν πιο αργό ρυθμό στη θερμοκρασιακή αύξηση. Για την ίδια αύξηση θερμοκρασίας, Δθ=17°C, για παράδειγμα, την πρώτη φορά χρειάστηκαν 3 min, ενώ τη δεύτερη 6 min, που σημαίνει ότι απαιτήθηκε διπλάσιο ποσό θερμότητας. Μια ακόμα αναλογία αρχίζει να διαφαίνεται. Είναι αυτή που υφίσταται ανάμεσα στο ποσό θερμότητας, που απαιτείται για ορισμένη θερμοκρασιακή αύξηση, και τη μάζα του σώματος.

Υπάρχουν βέβαια αποκλίσεις από την αναλογία, που μας κάνουν, δικαιολογημένα, να αμφιβάλλουμε. Με ακριβέστερα, όμως, πειράματα, που θα παίρνουν υπ' όψη τους τις απώλειες θερμότητας στο περιβάλλον και την ύπαρξη του θερμαινόμενου δοχείου, οι αμφιβολίες περιορίζονται.

Μπορούμε δηλαδή, να υποστηρίξουμε ότι η θερμότητα που απαιτείται για να αυξηθεί (κατά ορισμένο ποσό) η θερμοκρασία ενός σώματος (ή συστήματος) είναι ανάλογη προς τη μάζα του. Ή, με άλλα λόγια, ότι η θερμοχωρητικότητα ενός σώματος (ή συστήματος) είναι ανάλογη προς τη μάζα του.

Ο ρόλος του υλικού. Μέχρι τώρα πειραματιστήκαμε μόνο με νερό. Ας δούμε τι γίνεται αν θερμάνουμε ένα υγρό που δεν είναι νερό. Βάζουμε στο ίδιο δοχείο ένα κιλό πετρέλαιο.

t min	0	1	2	3	4
θ°C	21	32,5	39	52	61
Δθ (ΔΤ) °C (K)	–	11,5	18	31	40

Για μια ακόμα φορά η αναλογία μεταβιβαζόμενης θερμότητας και αύξησης θερμοκρασίας φαίνεται να ισχύει αλλά η αύξηση δείχνει να επηρεάζεται από το υλικό. Σε σχέση με το πρώτο πείραμα η θερμοκρασία ανεβαίνει πιο εύκολα. Μολονότι η μάζα είναι πάλι 1kg το γεγονός ότι το υλικό δεν είναι νερό αλλά πετρέλαιο δείχνει να επηρεάζει την αύξηση της θερμοκρασίας. Η εξάρτηση αυτή της θερμοκρασιακής αύξη-

σης από το υλικό περιγράφεται με το μέγεθος *ειδική θερμότητα* (c) και με την εξίσωση $Q = mc\Delta\theta$.

Η σύνθεση. Το τελικό μας, λοιπόν, συμπέρασμα θα πρέπει να συμπεριλάβει το ότι η αύξηση της θερμοκρασίας ενός σώματος εξαρτάται από το ποσό της θερμότητας που μεταβιβάστηκε στο σώμα, από τη μάζα του σώματος και από τη φύση του υλικού. Το συμπέρασμα διατυπώνεται με την εξίσωση $Q = mc\Delta\theta$.

Σα ζητούμε

Να πάρετε μέρος σε ένα παρόμοιο πείραμα να κάνετε τη γραφική παράσταση $t = f(\Delta\theta)$.

Βασιζόμενοι σ' αυτήν να υπολογίσετε την ανά μονάδα χρόνου μεταβιβαζόμενη στο νερό θερμότητα. Να αναζητήσετε την ειδική θερμότητα του νερού από τον σχετικό πίνακα του βιβλίου.

Β' μέρος

Δραστηριότητες

1. Έμμεσες μετρήσεις 2. Φωτογραφίες και ταχύτητα 3. Οι αργοί ρυθμοί της φύσης 4. Καταγραφές κινήσεων 5. Ο χρόνος αντίδρασης 6. Χρονοφωτογραφία της πτώσης 7. Ποιο κέρμα θα φθάσει πρώτο 8. Ποιο έχει μεγαλύτερη μάζα; 9. Ποιο νήμα θα σπάσει; 10. Το κέρμα στο ποτήρι 11. Ο τροχός του Maxwell 12. Ανακύκλωση 13. Να μετρήσουμε την ισχύ 14. Θερμική ισορροπία 15. Μέχρι να λιώσει το παγάκι.

1. Έμμεσες μετρήσεις



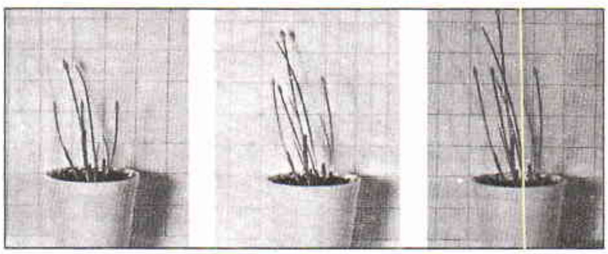
Χρησιμοποιώντας ένα υποδεκάμετρο να μετρήσετε α) τη διάμετρο μιας μπάλας β) τη διάμετρο διατομής ενός λεπτού σύρματος και γ) το πάχος ενός φύλλου από ένα βιβλίο σας. Περιγράψτε τη δουλειά που κάνατε και καταγράψτε τα αποτελέσματα.

2. Φωτογραφίες και ταχύτητα

Στην πρώτη φωτογραφία, το αυτοκίνητο είναι ακίνητο. Η δεύτερη φωτογραφία πάρθηκε με «χρόνο έκθεσης» 1/30 του δευτερολέπτου. Χρησιμοποιώντας προσεκτικά ένα υποδεκάμετρο δοκιμάστε να υπολογίσετε την ταχύτητα του αυτοκινήτου. Το μήκος του αυτοκινήτου είναι 4,10 μέτρα.

3. Οι αργοί ρυθμοί της φύσης

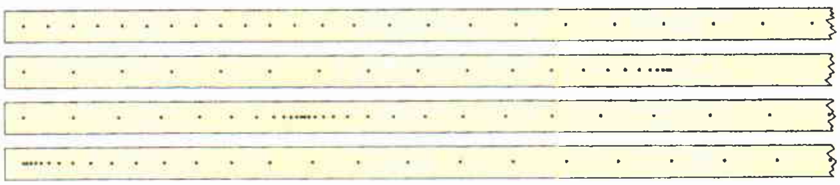
Υπολογίστε τη μέση ταχύτητα με την οποία αναπτύσσεται ο ψηλότερος βλαστός αυτού του φυτού.



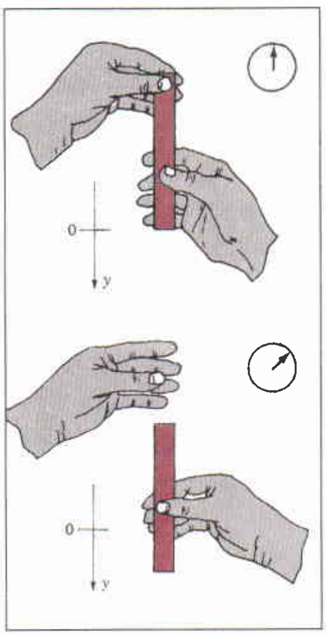
α. κατά τη χρονική διάρκεια από τη στιγμή t_1 μέχρι την t_2. **β.** κατά τη διάρκεια από τη στιγμή t_2 μέχρι την t_3. Στο μιλιμετρέ χαρτί η πλευρά κάθε μεγάλου τετραγώνου είναι 2,5 cm. Είναι γνωστό, επίσης ότι $t_2 - t_1 = 17h$ και $t_3 - t_1 = 50h$.

4. Καταγραφές κινήσεων

Οι παρακάτω χαρτοταινίες έχουν παραχθεί από ηλεκτρικό χρονομετρητή με συχνότητα 50Hz.



Σας ζητούμε να ελέγξετε εάν ορισμένες από τις τέσσερις αυτές ευθύγραμμες κινήσεις είναι ομαλές ή ομαλά επιταχυνόμενες.

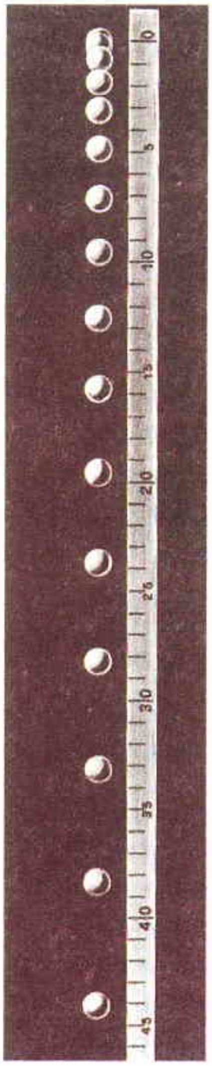


5. Ο χρόνος αντίδρασης

Ο Β κρατάει ένα υποδεκάμετρο σε θέση κατακόρυφη. Ο Α δεν το ακουμπάει αλλά έχει βάλει τα δάκτυλά του κοντά στο μηδέν της κλίμακας και βρίσκεται σε επιφυλακή, ώστε να ενεργήσει ακαριαία και να πιάσει το χάρακα, αμέσως μόλις αντιληφθεί ότι τον αφήνει ο Β. Πώς θα προσδιοριστεί ο χρόνος αντίδρασης του Α; Προσπαθήστε να προσδιορίσετε το δικό σας χρόνο αντίδρασης. [Χρόνος αντίδρασης ενός ατόμου λέγεται ο ελάχιστος χρόνος που μεσολαβεί ανάμεσα στην αίσθηση ενός γεγονότος και στην έναρξη της ενέργειας που προκαλεί αυτό το γεγονός].

6. Χρονοφωτογραφία της πτώσης

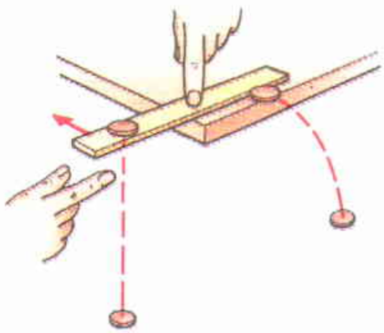
Στην εξαιρετική αυτή χρονοφωτογραφία το χρονικό διάστημα ανάμεσα σε δύο διαδοχικές θέσεις της σφαίρας είναι 1/50 του δευτερολέπτου. Σας ζητούμε βασιζόμενοι σ' αυτήν και χρησιμοποιώντας ένα απλό διαφανές υποδεκάμετρο να



υπολογίσετε την επιτάχυνση της ελεύθερης πτώσης.

7. Ποιο κέρμα θα φτάσει πρώτο;

Βάζουμε ένα κέρμα Α στη γωνία ενός θρανίου ή ενός τραπεζιού. Πίσω από αυτό τοποθετούμε ένα χάρακα έτσι ώστε ένα τμήμα του να προεξέχει από το άκρο του του θρανίου. Με τον δείκτη του χεριού πατάμε τον χάρακα έτσι ώστε να μπορεί να περιστρέφεται σε οριζόντιο επίπεδο παρασύροντας το κέρμα. Πάνω στον χάρακα, στη μια του άκρη, τοποθετούμε ένα άλλο κέρμα Β. Χρησιμοποιώντας ένα βιβλίο ετοιμαζόμαστε να χτυπήσουμε τον χάρακα κοφτά. Με το χτύπημα, το κέρμα που ήταν πάνω στον χάρακα θα πέσει κατακόρυφα προς το πάτωμα ενώ το άλλο θα εκτοξευθεί οριζόντια και θα προσγειωθεί πιο μακριά.



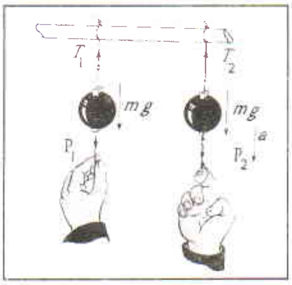
Πριν χτυπήσουμε τον χάρακα σας ζητούμε να προβλέψετε εάν i) το κέρμα Α θα φθάσει πρώτο στο πάτωμα ii) το κέρμα Β θα φθάσει πρώτο στο πάτωμα iii) τα δύο κέρματα θα φθάσουν ταυτόχρονα και να δικαιολογήστε την πρόβλεψή σας

Χτυπάμε στη συνέχεια τον χάρακα με το βιβλίο, τα κέρματα προσγειώνονται και συγκρίνουμε αυτό που παρατηρήσαμε με αυτό που είχε ο καθένας προβλέψει. Επιχειρούμε τέλος να ερμηνεύσουμε αυτό που τελικά συνέβη.



8. Ποιο έχει μεγαλύτερη μάζα

Βρίσκουμε δυο όμοια κουτιά από αναψυκτικό. Το ένα το γεμίζουμε με άμμο ενώ το άλλο το διατηρούμε άδειο. Τα κρεμάμε με σπάγκο ώστε να βρίσκονται στο ίδιο ύψος. Πως θα μπορούσαμε να διαπιστώσουμε ποιο έχει τη μεγαλύτερη μάζα; Συζητήστε πάνω σ' αυτό το θέμα.

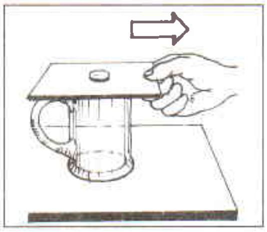


9. Ποιο νήμα θα σπάσει;

Αν τραβήξουμε μαλακά, σπάει το πάνω νήμα, ενώ αν τραβήξουμε απότομα, σπάει το κάτω. Δεδομένου ότι τα δύο νήματα έχουν την ίδια ανθεκτικότητα, δώστε μια εξήγηση.

Μπορούμε να το πραγματοποιήσουμε χρησιμοποιώντας ένα βαρίδι 100p ή 200p και δύο κομμάτια κλωστής ραψίματος.

10. Το κέρμα στο ποτήρι

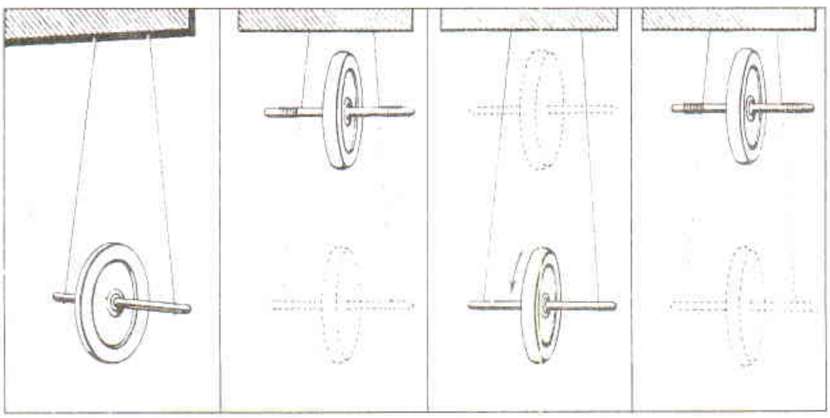


Βάλτε ένα φύλλο χαρτί πάνω σ' ένα ποτήρι. Πάνω στο χαρτί τοποθετήστε ένα δεκάρικο. Τραβήξτε αργά το χαρτί. Θα διαπιστώσετε ότι θα πάρει μαζί του το κέρμα. Αν το επαναλάβετε τραβώντας απότομα το χαρτί, το κέρμα θα πέσει μέσα στο ποτήρι. Μπορείτε να το εξηγήσετε;

11. Ο τροχός του Maxwell

Τι πρέπει να γνωρίζουμε

α) Όσο πιο ψηλά βρίσκεται ένα αντικείμενο τόσο μεγαλύτερη είναι η (βαρυτική) δυναμική του ενέργεια.
β) Όσο πιο γρήγορα στρέφεται ένας τροχός τόσο μεγαλύτερη είναι η κινητική του ενέργεια.
γ) Σ' ένα σύστημα με μικρές ενεργειακές απώλειες, το άθροισμα κινητικής και δυναμικής ενέργειας εμφανίζεται σχεδόν σταθερό καθώς ελαττώνεται με πολύ αργούς ρυθμούς.

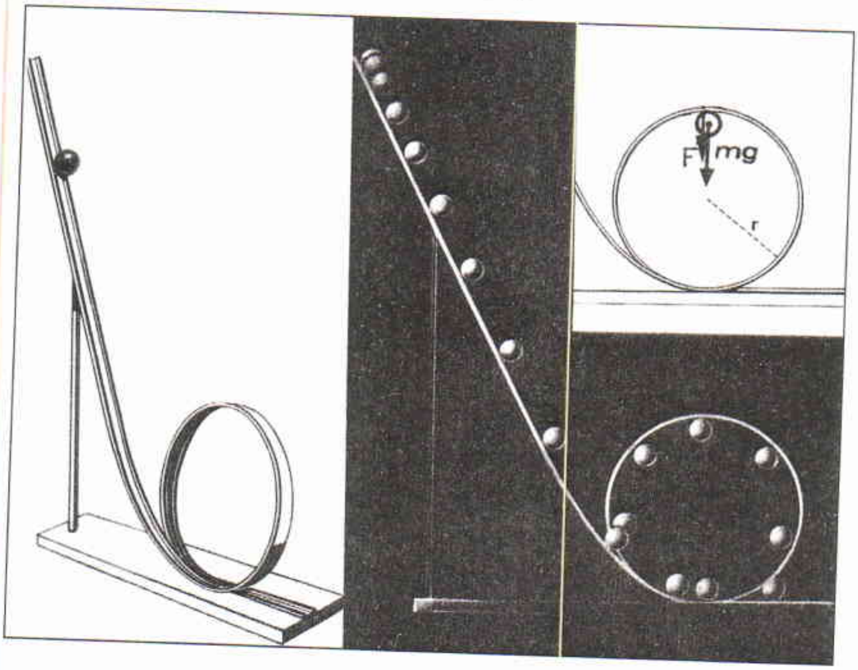


Τι κάνουμε • Τι παρατηρούμε	***Πως «μεταφράζουμε» αυτό που συμβαίνει στη γλώσσα της ενέργειας***
α) Στρέφουμε τον μεταλλικό τροχό γύρω από τον άξονά του έτσι ώστε τα δύο νήματα να τυλιχθούν πάνω στον άξονα και ο τροχός να ανυψωθεί στην κορυφή της διάταξης.	Μεταβιβάζουμε ενέργεια στον τροχό. Στην κορυφή της διάταξης ο τροχός έχει περισσότερη ενέργεια από όση είχε όταν βρισκόταν στη βάση της διάταξης.
β) Αφήνουμε τον τροχό ελεύθερο οπότε τον βλέπουμε να περιστρέφεται με φορά αντίθετη από εκείνη που τον στρέφαμε όταν τυλίγαμε το νήμα και ταυτόχρονα να κατέρχεται. Καθώς κατεβαίνει και το νήμα ξετυλίγεται, ο τροχός στρέφεται όλο και πιο γρήγορα.	Η δυναμική ενέργεια του τροχού ελαττώνεται ενώ αυξάνει η κινητική του ενέργεια.
γ) Ο τροχός φθάνει στη χαμηλότερη θέση και εξακολουθεί να περιστρέφεται.	Ο τροχός παρουσιάζει τη μικρότερη δυναμική ενέργεια και τη μεγαλύτερη κινητική από κάθε άλλη θέση.
δ) Το νήμα αρχίζει πάλι να τυλίγεται πάνω στον άξονα και ο τροχός ανεβαίνει ενώ στρέφεται γύρω από τον άξονα, όλο και πιο αργά.	Η δυναμική ενέργεια του τροχού αυξάνεται η κινητική ελαττώνεται.
ε) Ο τροχός στιγμιαία ακινητεί.	Η κινητική ενέργεια μηδενίζεται, η δυναμική έχει τη μέγιστη τιμή.
στ) Ο τροχός αρχίζει πάλι να στρέφεται με αντίθετη φορά, όλο και πιο γρήγορα και να κατεβαίνει.	Η κινητική ενέργεια αυξάνεται ενώ η δυναμική ενέργεια μειώνεται.

12. Ανακύκλωση

Η πράξη. Μια συσκευή παρόμοια με αυτή του σχήματος, υπάρχει στο σχολικό εργαστήριο. Αφήνουμε τη μπίλια από ύψος τριπλάσιο της ακτίνας του κυκλικού οδηγού και παρατηρούμε ότι κάνει ανακύκλωση. Δοκιμάζουμε στη συνέχεια να το πετύχουμε αφήνοντάς την από όλο και μικρότερο ύψος, αναζητώντας το ελάχιστο ύψος από το οποίο είναι δυνατόν να κάνει ανακύκλωση. Μετράμε το ελάχιστο αυτό ύψος.

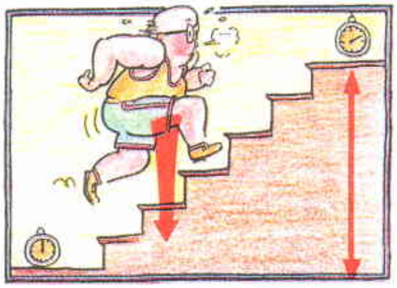
Η θεωρία. Σας ζητούμε, αγνοώντας, τις τριβές να μελετήσετε το ίδιο ζήτημα θεωρητικά, βασιζόμενοι δηλαδή σε φυσικούς νόμους να προβλέψετε το ελάχιστο ύψος για ανακύκλωση. Να συγκρίνετε το αποτέλεσμα στο οποίο οδηγεί η θεωρία με το αντίστοιχο της έμπρακτης δοκιμής.



13. Να μετρήσουμε την ισχύ

13. Με μια μετροταινία κι ένα χρονόμετρο, μπορείτε – εφόσον ξέρετε το βάρος σας– να υπολογίσετε τη μέση ισχύ που αναπτύσσει ο οργανισμός σας κατά το ανέβασμα μιας σκάλας. Μετρήστε πρώτα το ύψος δύο ορόφων. Θα χρειαστείτε,

ίσως, ένα κομμάτι κλωστή. Ξεκινήστε από κάτω κι αρχίστε να ανεβαίνετε όσο πιο γρήγορα μπορείτε. Θα χρειαστεί κι ένας φίλος για να χρονομετρήσει το ανέβασμά σας.



Αυτό μπορεί να γίνει και στο σχολείο εφόσον, βέβαια, υπάρχουν σκαλοπάτια και όροφοι. Θα χρειαστούν ορισμένοι εθελοντές που να γνωρίζουν το βάρος τους. Πρέπει επίσης να βρεθούν χρονομέτρες καθώς και κάποιος που θα μετρήσει με υποδεκάμετρο πόσο ύψος έχει κάθε σκαλοπάτι.

14. Θερμική ισορροπία

Μέσα σ' ένα θερμιδόμετρο βάζουμε νερό, τη μάζα του οποίου έχουμε προηγουμένως μετρήσει είτε άμεσα μ' ένα ζυγό είτε έμμεσα με ογκομετρικό σωλήνα. Με το θερμόμετρο «διαβάζουμε» τη θερμοκρασία του συστήματος. Ζεσταίνουμε ύστερα μέχρι το σημείο βρασμού μια άλλη ποσότητα νερού, του οποίου τη μάζα έχουμε επίσης φροντίσει να μετρήσουμε. Χύνουμε στη συνέχεια το ζεστό νερό στο θερμιδόμετρο. Όταν αποκαστασταθεί θερμική ισορροπία καταγράφουμε τη θερμοκρασία του συστήματος. Μπορούμε μ' αυτά τα στοιχεία να προσδιορίσουμε τη θερμοχωρητικότητα του θερμιδομέτρου; Η τιμή που θα προκύψει θα περιέχει οπωσδήποτε κάποιο σφάλμα. Ποια είναι η κυριότερη αιτία αυτού του σφάλματος;

15. Μέχρι να λιώσει το παγάκι

Βάλτε σ' ένα ποτήρι μια ποσότητα νερού, του οποίου έχετε προηγουμένως μετρήσει –με ζυγό ή με ογκομέτρηση– τη μάζα. Χρησιμοποιώντας ένα θερμόμετρο προσδιορίστε και τη θερμοκρασία του. Πάρτε ύστερα ένα παγάκι από την κατάψυξη, μετρήστε σύντομα τη μάζα του, βάλτε το στο νερό και κάνετε υπομονή, μέχρι να λιώσει. Τη στιγμή που θα έχει λιώσει ολόκληρο σημειώστε τη θερμοκρασία. Παίρνοντας υπόψη ότι η θερμότητα τήξης του πάγου είναι $3{,}30 \cdot 10^5\ J/kg$ υπολογίστε τη θερμοκρασία που θα έπρεπε να έχει το σύστημα αν ήταν θερμικά απομονωμένο. Συγκρίνετε τις δύο θερμοκρασίες και βγάλετε τα σχετικά συμπεράσματα.

Βιβλιογραφία

Εγχειρίδια διδασκαλίας

1. Bautrant R., Bramand P. et all. SCIENCE PHYSIQUES 2e. Hachete, Paris 1981.
2. Bottaro P., Lacourt J., Rouzaud L. PHYSIQUE 2e Colin, Paris 1981.
3. Brodie D. PHYSICS Oxford University Press U.K. 1996.
4. Cackett G. κ.α. CORE PHYSICS Oxford University Press k.k. 1983.
5. Dorling G κ.α. PHYSICS Nuffield Coordinated Sciences U.K. 1994.
6. Faughn J, Kuhn K. PHYSICS FOR PEOPLE WHO THINK THEY DON'T LIKE PHYSICS Saunders Company Philadelphia U.S.A. 1976.
7. Fortuzzi Maria Giovanna NOZIONI DI FISICA εκδ. Zanichelli Bologna 1984.
8. Fuller J., Goates LIGHT ON PHYSICS εκδ. Cambridge University Press U.K. 1982.
9. Fullick P. PHYSICS εκδ. Heinemann U.K. 1994.
10. Haber – Schaim Uri, Dodge J, Walter J. PSSC ΦΥΣΙΚΗ Απόδοση στα ελληνικά Θανάσης Κωστίκας εκδ. Ίδρυμα Ευγενίδου Αθήνα 1992.
11. Halliday P., Resnick R., PHYSICS John Wiley and Sons. N. York 1966.
12. Holton G., Rutherford F., Watson F. THE PROJECT PHYSICS COURSE (HPP).
Στην Ιταλική έκδοση Unità 1: Il moto, Unità 3: Il trionfo della meccanisa (1977). Στην Καναδέζικη έκδοση, tome 1: Les concepts du mouvement (1980).
13. Jardine J. PHYSICS IS FUN. Heinemann Educational Books, London.
14. Johnson Keith PHYSICS FOR YOU εκδ. Stanley Thornes U.K. 1995.
15. Parsons. S., Prichard I. PHYSICS εκδ. Collins Educational U.K. 1996.
16. Pople S., Whitehead P. PHYSICS Oxfordd Unifersity Press U.K. 1996.
17. Riban D. INTRODUCTION TO PHYSICAL SCIENCES Mc Graw-Hille New York 1982.
18. Spears J., Zallman D. THE FASCINATION OF PHYSICS εκδ. The Benjamin/Cummings P.C. U.S.A. 1985.

Ιστορία των Επιστημών και Επιστημολογία

19. Αριστοτέλους ΦΥΣΙΚΗ ΑΚΡΟΑΣΙΣ (ΤΑ ΦΥΣΙΚΑ) Μετάφραση Κ.Δ. Γεωργούλη. Εκδόσεις Δ.Ν. Παπαδήμα, Αθήνα 1972.
20. Bernal J. Η ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΣΤΗΝ ΙΣΤΟΡΙΑ. Τόμος Β. Η επιστήμη και η βιομηχανική επανάσταση. Μετάφραση Ε. Μπιτσάκη. Εκδ. Ι. Ζαχαρόπουλος, Αθήνα 1983.
21. Butterfield H. Η ΚΑΤΑΓΩΓΗ ΤΗΣ ΣΥΓΧΡΟΝΗΣ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ (1300-1800). Μετάφραση Ι. Αρζόγλου, Α. Χριστοδουλίδης. Εκδ. «Μορφωτικό Ίδρυμα Εθνικής Τραπέζης» Αθήνα 1983.
22. Cohen I. INTRODUCTION TO NEWTON'S «PRINCIPIA». Harvard University Press, Massachusetts, 1978.
23. Coveney P., Highfield R. ΤΟ ΒΕΛΟΣ ΤΟΥ ΧΡΟΝΟΥ Μετάφραση Τάσος Κυπριανίδης Εκδ. Κάτοπτρο Αθήνα 1990.
24. Γιώργου Γραμματικάκη. Η ΚΟΜΗ ΤΗΣ ΒΕΡΕΝΙΚΗΣ, Πανεπιστημιακές εκδόσεις Κρήτης.
25. Einstein A., Infeld L. Η ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΩΝ ΙΔΕΩΝ ΣΤΗ ΦΥΣΙΚΗ. Μετάφραση Ε.

Μπιτσάκη. Εκδ. «Δωδώνη», Αθήνα 1978.

26. Guillen M. FIVE EQUATIONS THAT CHANGED THE WORLD. εκδ. Little, Brown and Company U.S.A. 1995.
27. Harman P.M. ΕΝΕΡΓΕΙΑ, ΔΥΝΑΜΗ ΚΑΙ ΥΛΗ. Απόδοση στα ελληνικά Τάσος Τσιαντούλας, Πανεπιστημιακές εκδόσεις Κρήτης, 1994.
28. Hawking N. Stephen ΤΟ ΧΡΟΝΙΚΟ ΤΟΥ ΧΡΟΝΟΥ εκδ. Κάτοπτρο Αθήνα 1996.
29. Hewitt P. ΟΙ ΕΝΝΟΙΕΣ ΤΗΣ ΦΥΣΙΚΗΣ Μετάφραση Ελένη Σηφάκη. Πανεπιστημιακές εκδόσεις Κρήτης 1992.
30. Koestler A. ΟΙ ΥΠΝΟΒΑΤΕΣ Μετ. Ι. Χατζηνικολή Εκδόσεις Χατζηνικολή Αθήνα 1975.
31. Stewart Ian ΠΑΙΖΕΙ Ο ΘΕΟΣ ΖΑΡΙΑ; Η ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΤΟΥ ΧΑΟΥΣ μετ. Κ. Σαμαράς εκδ. Κωσταράκη Αθήνα 1991.

Ο πίνακας ζωγραφικής της σελίδας με την οποία «ανοίγει» το κεφάλαιο *Ο χώρος και ο χρόνος* είναι της Έλλης Αβραμάντη-Δρακοπούλου (1980).

Ο πίνακας ζωγραφικής της σελίδας με την οποία ανοίγει το κεφάλαιο *Περιγραφή της κίνησης* είναι του Αλέκου Φασιανού (1981).

Ο πίνακας με τον οποίο ανοίγει το πέμπτο κεφάλαιο είναι του Αριστείδη Βλάση (Ιστορική φωτογραφία, 1979).

Τα σκίτσα με τη Μαφάλντα είναι του Αργεντινού Quino, από την ελληνική έκδοση της Μαφάλντα, Εκδόσεις «Βαβέλ». Το σκίτσο με τον τερματοφύλακα καθώς και το σκίτσο στον δεύτερο νόμο της κίνησης είναι του επίσης Αργεντινού σκιτσογράφου Mordillo.

Ο πίνακας με τις ταχύτητες των ζώων είναι από την εγκυκλοπαίδεια «Δομή».

Ο πίνακας ζωγραφικής «Θάνατος του Κοπέρνικου», η προσωπογραφία του Kepler και η εικόνα του δορυφόρου είναι από το βιβλίο *Il Mondo della Scienza* εκδόσεις «Mondadori», Μιλάνο 1978.

Ο πίνακας με τις τιμές των μαζών είναι από το βιβλίο *Physics* D. Halliday-R. Resnick εκδ. 1966 εκδ. John Wiley and Sons N. York 1966.

Ορισμένες από τις φωτογραφίες και τα σχήματα προέρχονται από τα βιβλία που αναφέρονται στη βιβλιογραφία με αριθμούς 1,2,3,4,5,6,7,8,10,12,13,14,18,29.

Μικρά αποσπάσματα, περίπου αυτούσια, χρησιμοποιήθηκαν από τα βιβλία με αριθμό βιβλιογραφίας 12,17,20,30.

Ευρετήριο

Α

Αδράνεια 90,94
Αέριο 227
Ακτινοβολία 240
Ανάλυση μιας δύναμης 87
Αριστοτέλης 51,58
Αριστοτελική Φυσική 88
Αρχή ανεξαρτησίας των κινήσεων 63
Αρχή της διατήρησης της ενέργειας 214
Αρχή της διατήρησης της ορμής 130
Αταξία ενός συστήματος 235
Άτομο 224

Β

Βάρος 55,102,119,123
Βαρυτική δυναμική ενέργεια
Βαρυτική επιτάχυνση 55,123
Βατ-μονάδα μετρήσεως 184
Βατ Τζεημς (Watt James) 152

Γ

Γαλιλαίος 52
Γκαγκάριν Γιούρι 124

Δ

Διάνυσμα 32
Διατήρηση της μηχανικής ενέργειας 173
Δευτερόλεπτο 20
Διατήρηση της ενέργειας 214
Διατήρηση της ορμής 126
Δορυφόρος 124
Δράση-αντίδραση 105
Δύναμη 81
Δυναμική ενέργεια 168

Ε

Ειδική θερμότητα 203,205
Ελαστικές παραμορφώσεις 84
Ελαστική δυναμική ενέργεια 172
Ελατήριο 84,160
Ελεύθερη πτώση 51
Εντροπία 234
Εξισώσεις κινήσεις
Έργο 154
Εσωτερική ενέργεια 224
Ευθύγραμμη ομαλά επιταχυνόμενη κίνηση 46
Ευθύγραμμη ομαλή κίνηση 38

Η

Ηλιακή ακτινοβολία 240
Ήλιος 24

Θ

Θεμελιώδης νόμος της δυναμικής 94
Θερμαντική ικανότητα καυσίμου 239
Θερμοκρασία 196
Θερμότητα 202
Θερμότητα εξαέρωσης 208
Θερμότητα τήξης 209
Θερμοχωρητικότητα 204
Θέση 17,35

Ι

Ισχύς 183

Κ

Κάθετη αντίδραση 107
Κανόνας των μετατοπίσεων 33
Κανόνας του παραλληλογράμμου 34

Κεντρομόλος δύναμη 112
Κεντρομόλος επιτάχυνση 59,112
Κίνηση σε μία διάσταση 36
Κινητική ενέργεια 161
Κλαούζιους Ρούντολφ
(Clausius Rudolf) 235
Κλίμακα Κέλβιν 199
Κλίμακα Κελσίου 198

Μ

Μάγερ Ρόμπερτ 214
Μάζα 94
Μεταβιβαζόμενη ενέργεια 153,212
Μετατόπιση 32
Μέτρο - μονάδα μήκους 13,26
Μηχανική ενέργεια 176
Μικρόκοσμος 232,226,228
Μόριο 225

Ν

Νεύτων Ισαάκ (Newton Isaac) 80,90
Νευτωνική σύνθεση 79
Νιούτον - μονάδα μετρήσεως 98
Νόμος της αδράνειας 91
Νόμος δράσης αντίδρασης 103
Νόμος της ελεύθερης πτώσης 52
Νόμος της παγκόσμιας έλξης 121

Ο

Ομαλή κυκλική κίνηση 60,112
Οργάνωση ενός συστήματος 235
Οριζόντια βολή 65
Ορμή 129

Π

Περιοδικό φαινόμενο 20,62
Περίοδος 20,62

Σ

Σταθερά του ελατηρίου 84
Στατική τριβή 108
Σύνθεση Δυνάμεων 86
Συνισταμένη δυνάμεων 86
Συντελεστής στατικής τριβής 109
Συντελεστής τριβής ολίσθησης 111
Σύστημα αναφοράς 18,31
Συχνότητα 20,62

Τ

Ταχύτητα 41
Τζάουλ-Μονάδα μετρήσεως 154
Τζάουλ Τζέιμς Πρίσκοτ 215
Τριβή ολίσθησης 110
Τροχιά 30

Υ

Υποβάθμιση της ενέργειας 231

Χ

Χημική ενέργεια 238
Χουκ Ρόμπερτ (Hooke Robert) 84
Χρησιμότητα της ενέργειας 235
Χρονική διάρκεια 19
Χρονική στιγμή 19
Χρόνος 19
Χώρος 12

ΕΚΔΟΣΗ Β' 1999 (ΑΝΑΜΟΡΦΩΜΕΝΗ) - ΑΝΤΙΤΥΠΑ 142.000 - ΑΡ. ΣΥΜΒΑΣΗΣ 2022/8-2-99
ΕΚΤΥΠΩΣΗ: Ν. ΒΑΣΙΛΕΙΟΥ - Γ. ΚΕΦΑΛΟΠΟΥΛΟΣ Ο.Ε.
ΒΙΒΛΙΟΔΕΣΙΑ: Β. ΔΑΛΑΡΗΣ & ΣΙΑ Ε.Ε.